

Optical pulse amplification system

Publication number: DE19812203

Publication date: 1998-09-24

Inventor: GALVANAUSKAS ALMANTAS DR (US); HARIHARAN ANAND DR (US); HARTER DONALD J DR (US)

Applicant: IMRA AMERICA INC (US)

Classification:

- **International:** G02F1/35; B23K26/06; B23K26/40; G02F1/39; H01S3/06; H01S3/10; H01S3/108; H01S3/00; H01S3/115; B23K26/00; B23K26/06; G02F1/35; H01S3/06; H01S3/10; H01S3/108; H01S3/00; H01S3/11; (IPC1-7): G02F1/39; H01S3/11

- **European:** B23K26/06B4B; B23K26/40B; G02F1/39

Application number: DE19981012203 19980319

Priority number(s): US19970822967 19970321

Also published as:

 US6208458 (B1)

 US6181463 (B1)

 JP10268369 (A)

[Report a data error here](#)

Abstract of DE19812203

The optical pulse amplification system includes a pump source (100; 210; 710) which produces optical pump pulses of a predetermined duration, a signal source (130; 200; 440; 705; 740) which produces optical signal pulses, and combining optics (106, 160; 221, 223; 460) which receives and combines the optical pump pulses and the optical signal pulses, to provide thereby combined optical pulses. A parametric amplifier (170; 220; 470) includes a quasi-phase adjusted crystal which receives the combined optical pulses and amplifies the optical signal pulses under application of energy from the optical pump pulses.

Data supplied from the **esp@cenet** database - Worldwide

(19) BUNDESREPUBLIK

DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

Offenlegungsschrift

(10) DE 198 12 203 A 1

(51) Int. Cl. 6:
G 02 F 1/39
H 01 S 3/11

(30) Unionspriorität:

08/822,967 21. 03. 97 US

(71) Anmelder:

IMRA America, Inc., Ann Arbor, Mich., US

(74) Vertreter:

Tiedtke, Bühlung, Kinne & Partner, 80336 München

(21) Aktenzeichen: 198 12 203.9

(22) Anmeldetag: 19. 3. 98

(43) Offenlegungstag: 24. 9. 98

(72) Erfinder:

Galvanauskas, Almantas, Dr., Ann Arbor, Minn., US; Hariharan, Anand, Dr., Ann Arbor, Minn., US; Harter, Donald J., Dr., Ann Arbor, Minn., US

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Quasi-phasenangepaßtes parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem

(55) Die Verwendung von quasi-phasenangepaßten (QPM-)Werkstoffen zur parametrischen Chirp-Impulsverstärkung (PCPA) verringert wesentlich die erforderliche Pumpspitzenleistung und Pumphelligkeit und erlaubt so die Auswertung von räumlich-multimodalen und langdauernden Pumpimpulsen. Sie beseitigt ferner Beschränkungen der Pumpwellenlänge und der Verstärkungsbandbreite. Dies ermöglicht eine wesentliche Vereinfachung der Pumpaseranordnung für ein Hochenergie-PCPA-System und, demzufolge, die Konstruktion von kompakten diodengepumpten Quellen ultrakurzer optischer Impulse hoher Energie. Darüber hinaus erlaubt dies die Beseitigung von die Verstärkung schmälernden und phasenverzerrenden Beschränkungen der minimalen Impulsdauer, welche typisch in einem Chirpimpulsverstärkungssystem auftreten. Ein Beispiel für eine kompakte Quelle ultrakurzer Impulse hoher Energie ist ein Mehrfachkern-Faser-basiertes Chirpimpulsverstärkungssystem. Beschränkungen der Impulsenegie aufgrund der beschränkten Kerngröße für Monomode-Fasern werden durch Verwenden eines großen Multimode-Kerns umgangen. Beschränkungen der Impulsdauer und der Strahlqualität aufgrund des Multimode-Kerns werden durch Verwenden eines Chirp-Impulsverstärkungssystems umgangen. Zusätzlich vereinfacht der große Kern der Multimode-Faser das Hüllpumpen durch preiswerte Multimode-Laserdioden mit hoher Leistung.

DE 198 12 203 A 1

DE 198 12 203 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Konvertieren optischer Impulse, die durch kompakte Pumpquellen für lange Impulse geringer Intensität, wie beispielsweise Dioden oder Faser- oder Festkörper-Laser, erzeugt werden, in ultrakurze optische Impulse hoher Energie durch die Verwendung von Mitteln zur optischen parametrischen Verstärkung.

Der Ausdruck "Impulse hoher Energie" bezieht sich hierbei auf optische Impulse mit Energiepegeln, die höher sind als diejenigen Energiepegel, die direkt aus Oszillatoren für ultrakurze Impulse erhalten werden können. Typisch erzeugen kompakte modenverriegelte Oszillatoren Impulse mit maximalen Energien auf dem 10 nJ-Niveau. Daher werden Impulse mit Energien von mehr als 10 nJ hierin als Impulse hoher Energie definiert.

Laser und Verstärker für ultrakurze Impulse gehören zu einer besonderen Klasse von Lasereinrichtungen, die schließlich kurze optische Impulse (an der Grenze der optischen Wellenlänge) mit Dauern im Bereich von Femtosekunden (10^{-15} s) bis hin zu Picosekunden (10^{-12} s) erzeugen. Die potentielle Verwendung solcher Impulse wird durch ihre charakteristischen Merkmale, die eine kurze Dauer, hohe Spitzenleistung und hohe räumliche und zeitliche Kohärenz umfassen, bestimmt.

Diodenlaser sind kompakte Quellen einer Laseremission, die zwei einzigartige technologische Vorteile besitzen. Erstens stellen Diodenlaser eine direkte Umwandlung von elektrischer Leistung in optische Leistung mit hohem Wirkungsgrad bereit. Zweitens sind sie monolithische Einrichtungen mit kleinen Abmessungen (typisch kleiner als 1 mm). Demzufolge sind ihre Parameter wie beispielsweise Größe, Robustheit, Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Herstellbarkeit und Kosten wesentlich besser als entsprechende Parameter anderer Laserstrukturen wie beispielsweise Gas-, Farb- oder große Festkörperlaser. Diese Schlüsselmerkmale machen sie ideal geeignet für die Entwicklung kommerziell lebensfähiger bzw. wirtschaftlicher Laserquellen. Jedoch ist die direkte Verwendung von Diodenlasern bei der Erzeugung ultrakurzer Impulse hoher Energie beschränkt. Dies wird im wesentlichen durch die kleine Querschnittsfläche einer Monomode-Diode bestimmt. Eine katastrophale Beschädigung der Diode und gravierende nichtlineare Verzerrungen der ultrakurzen Impulse beschränken die erzielbaren Spitzenintensitäten. Zusätzlich sind aufgrund derselben kleinen Querschnittsfläche auch die gespeicherte Energie und der Sättigungsverlauf beschränkt. Die maximalen Energien, die direkt aus einer Laserdiode erhalten werden können, sind auf etwa 100 pJ beschränkt; dieser Wert liegt an der unteren Grenze praktisch bedeutsamer Energien ultrakurzer Impulse. Während die effektive Querschnittsfläche einer Laserdiode durch Zurückgreifen auf Multitransversalmodus-Strukturen oder Mehrfachstreifen-Strukturen erhöht werden kann, erlaubt das Erfordernis der räumlichen und zeitlichen Kohärenz keine direkte Erzeugung ultrakurzer Impulse mit derartigen Einrichtungen.

Dies erfordert es, Dioden als Pumpquellen für andere Klassen von Lasern und Verstärker für ultrakurze Impulse zu verwenden, um praktisch anwendbare Systeme zu entwickeln. Mit seltenen Erden dotierte Faser-Laser repräsentieren eine solche Klasse von Einrichtungen und kommen Halbleiterverstärkermedien in Bezug auf Kompaktheit am nächsten, da diese in der Hauptsache durch die kleinen Abmessungen der Faser in Querrichtung bestimmt wird. Der typische Durchmesser einer Faserstruktur ist kleiner als 1 mm. Anders als ein Halbleiterlaser kann ein Faser-Laser zwar eine Länge von einigen Metern haben, kann jedoch

aufgrund der geringen Abmessungen in Querrichtung bzw. des geringen Querschnitts so aufgewickelt werden, daß er nur einen kleinen Raum einnimmt. Denn der Faser-Laser ist eine eindimensionale Struktur, bei der die Verteilung des optischen Felds in Querrichtung an jeder Position in Längsrichtung gleich ist. Mit seltenen Erden dotierte Fasern können mit Diodenlasern gepumpt werden. So wurden beispielsweise bekannte Er-dotierte Faser-Lasersysteme mit existierenden Hochleistungs-Laserdioden, die bei 1480 nm oder 980 nm emittieren, gepumpt.

Wie in dem hier durch Bezugnahme einbezogenen Artikel "Broad-area Diode-pumped 1 W Femtosecond Fiber System" von A. Galvanauskas, M. E. Fermann, D. Harter, J. D. Minelly, G. G. Vienne, J. E. Caplen in "Conference on Lasers and Electro-Optics", Band 9, 1996, OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, DC, 1996) auf Seiten 495 ff. berichtet, wird Pumplicht aus Hochleistungs-Multimode-Dioden durch Faser-Hüllpumpentechniken und Chirimpulsverstärkung wirkungsvoll in die Ausgabe eines ultrakurzen Impulses hoher Leistung konvertiert. Im allgemeinen ist eine Chirimpulsverstärkung für jeden Quantenverstärker erforderlich, um die maximal erhaltbaren Energien ohne nichtlineare Verzerrung der ultrakurzen Impulse oder eine optische Beschädigung der optischen Komponenten oder des Verstärkungsmediums extrahieren zu können. Typisch ist die Spitzenintensität eines ultrakurzen Impulses mit einer Energie, die gleich der Sättigungsenergie ist, höher als die Sättigungsfluenz des Mediums.

Um jedoch die räumliche und zeitliche Kohärenz zu erhalten und ultrakurze Impulse zu unterstützen, muß der Ausgang bzw.

das Ausgangssignal der Faser monomodal sein. Dies führt aus Gründen, die hier äquivalent zu dem Fall eines Monomode-Halbleiterlaser sind, zu Beschränkungen der Faserkerngröße und, demzufolge, der maximal erhaltbaren Impulsennergien und Spitzenintensitäten. Die maximal erhaltbaren Energien sind für eine Monomode-Faser jedoch wesentlich höher als für einen Halbleiter. Die maximalen, sättigungsfluenzbegrenzten Energien wurden experimentell bereits mit einigen diodengepumpten Er-Faser-Chirimpulsverstärkungssystemen erzeugt, mit erzielten Impulsennergien von mehr als 10 µJ nach der Verstärkung und Rekompression. Für eine Vielzahl praktischer Anwendungen, wie beispielsweise der Herstellung von Mikromaschinen, der optischen Chirurgie etc., werden viel höhere Energien ultrakurzer Impulse (typisch im Bereich zwischen 1 und 10 mJ) benötigt. Um diese Impulsennergien zu erzielen, werden herkömmlich großvolumige bzw. sperrige Quantenverstärker verwendet. In einem großvolumigen Medium ist die Strahlgröße bzw. der Strahldurchmesser wesentlich größer als der geführte monomodale Strahl in einer Faser- oder einer Halbleiterstruktur, wodurch das Problem hoher Spitzenintensitäten umgangen wird. Außerdem haben bestimmte Festkörper-Verstärkungsmedien Eigenschaften, die eine Darstellung kompakter Einrichtungen erlauben. Eine Anzahl von Beschränkungen, wie sie durch die allgemeinen Eigenschaften von Quantenverstärkern bestimmt werden, machen es jedoch praktisch schwierig, kompakte Festkörperkonstruktionen zur direkten Verstärkung von ultrakurzen Impulsen mit hoher Energie zu implementieren. Dies wird durch eine Betrachtung der allgemeinen Eigenschaften eines Quantenverstärkers offenbar.

Ein Quantenverstärker speichert Pumpenergie in einem oberen Niveau eines optischen Übergangszustands, die von einem durchlaufenden Signal durch die Wirkung einer optisch stimulierten Emission geerntet bzw. übernommen werden kann. Bekannte Festkörper-Verstärkungsanordnungen für ultrakurze Impulse beinhalten Verstärker für einfache

chen oder mehrfachen Durchlauf und regenerierende Verstärker, und stellen Impulsenergien in dem Bereich zwischen 1 µJ und 1 J bereit. Für diese Systeme ist eine Chirp-impulsverstärkung eine Notwendigkeit.

Großvolumige Laser und Verstärker weisen jedoch beträchtliche Einschränkungen auf. Erstens sind Festkörperlaser und Verstärker wesentlich größer und teurer als ihre Halbleiter- und Faser-Gegenstücke. Größe und Kosten werden dabei in der Hauptsache durch die erforderlichen sperrigen Pumpquellen, beispielsweise Hochleistungs-Ar-Laser oder Lampen, verursacht. Ein Pumpen mittels Dioden ist nur für wenige derartige Systeme möglich. Es ist erforderlich, einen Quantenverstärker innerhalb des festen Absorptionsbands des bestimmten Verstärkungsmediums zu pumpen. Für viele Medien beschränkt dies ein Pumpen mittels Diodenlaser oder schließt dieses aus, weil zuverlässige und hoch leistungsfähige Pumpdioden gegenwärtig für bei einigen wenigen Wellenlängen verfügbar sind. Das bekannteste Festkörpermedium für die Erzeugung ultrakurzer Impulse ist beispielsweise Ti:Saphir, welches nicht direkt durch einen Diodenlaser gepumpt werden kann.

Zweitens besitzen Quantenverstärker eine begrenzte Verstärkungsbandbreite, die durch die Breite des optischen Übergangs in dem bestimmten Verstärkungsmedium festgelegt ist. Die schmale Breite der Verstärkungsbandbreite beschränkt wesentlich die Verwendung bestimmter Werkstoffe zum Verstärken ultrakurzer Impulse.

Drittens beschränken intrinsische Eigenschaften des Verstärkungsmediums, wie beispielsweise die Lebensdauer des angeregten optischen Übergangs und der stimulierte Emissionsquerschnitt, die aus einem bestimmten Quantenverstärker maximal extrahierbare Leistung und Impulsenergie.

Viertens sind große Verstärker bei hohen Leistungsspitzen anfällig für thermische Effekte, die die optischen Eigenschaften des Verstärkungsmediums ändern. Dies führt dazu, daß der Betrieb solcher Einrichtungen empfindlich gegenüber Änderungen in der Umgebung wird.

Ein alternativer Ansatz zum Erreichen einer optischen Verstärkung besteht darin, eine optische parametrische Verstärkung (OPA) in einem nichtlinearen Material zu verwenden. In Übereinstimmung mit dem Ansatz der optischen parametrischen Verstärkung wird Pumpenergie nicht in dem Material gespeichert, sondern direkt aus der Pumpe in das Signal übertragen; das nichtlineare Material ist nur Mittler dieses Vorgangs. Impulsverzerrungen durch Phasenverzerrung können im allgemeinen vermieden werden, weil die Nichtlinearität zweiter Ordnung viel stärker ist als die der dritten Ordnung (die für Selbst- oder Kreuzphasenmodulation verantwortlich ist). Die maximal erhaltbare Energie wird im wesentlichen durch die Beschädigungsschwelle des bestimmten Materials begrenzt. Die erforderliche Pumpwellenlänge und die erhaltbare Verstärkungsbandbreite werden durch die grundlegenden optischen Eigenschaften des bestimmten Kristalls, wie beispielsweise die Ausrichtung und die Größe der Brechungsindex-Ellipsoide bei den sich gegenseitig beeinflussenden Wellenlängen in herkömmlicher birefringenter Phasenanpassung, festgelegt. Diese grundlegenden optischen Eigenschaften bestimmen auch die nützliche Kristallorientierung und, demzufolge, die Amplitude der Nichtlinearitäten, die genutzt werden können. In der Praxis beschränkt dies die Pumpwellenlängen und Bandbreiten, die mit den verfügbaren nichtlinearen Werkstoffen zugänglich sind, und führt im allgemeinen zu den hohen Energien, die zum Pumpen solcher Verstärker notwendig sind. Infolge der vorstehend genannten Beschränkungen wird gegenwärtig eine parametrische gegenseitige Beeinflussung vorwiegend als Mittel zum Konvertieren der Wellenlänge eines optischen Signals und nicht als Mittel zur

Energieverstärkung eingesetzt.

In dem hierin durch Bezugnahme einbezogenen Artikel "Powerful Femtosecond Pulse Generating Chirped and Stretched Pulse Parametric Amplification in BBO Crystals" von A. Dubietis, G. Jonusauskas und A. Piskarskas in Opt. Comm. 88, 437 (1992) wird vorgeschlagen, daß ultrakurze optische Impulse mit hoher Energie durch die Verwendung von optischen parametrischen Verstärkern anstelle von herkömmlichen Quantenverstärkern erhalten werden können.

10 Dieser Artikel lehrt, daß ultrakurze optische Impulse gestreckt bzw. gedehnt werden müssen, um für einen wirkungsvollen Energietransfer aus der Pumpe in das Signal mit der Dauer des Pumpimpulses übereinzustimmen. Diese Arbeit demonstrierte eine 1 : 30-Umwandlung von einer 3 mJ-Pumpe bei 0,53 µm in ein 100 µJ-Signal bei 1,06 µm mit kurzen (etwa 5 ps langen) gestreckten Pumpimpulsen.

Die Arbeit von Dubietis et. al. lehrt jedoch weder eine Energieumwandlung von Strahlen geringer Helligkeit zu Strahlen großer Helligkeit, noch wie eine kompakte Quelle

20 ultrakurzer Impulse mit hoher Energie durch die Verwendung von kompakten Pumpquellen, wie beispielsweise Dioden, Fasern oder Mikrochip-Lasern erzielt werden kann. (Eines der Probleme, die auftreten würden, besteht darin, daß, um denselben Umwandlungswirkungsgrad mit längeren Pumpimpulsen (im Nanosekunden-Bereich) zu demon-

25 strieren, die Impulsenergien proportional um einen Faktor von etwa 100 (in den Joule-Bereich) erhöht werden müßten. Gegenwärtig ist es schwierig, solche hohen Energien aus kompakten Impulsquellen zu erzielen). Ferner beseitigt

30 diese Arbeit nicht die Beschränkungen der Pumpwellenlänge und der Verstärkungsbandbreite eines Verstärkers für ultrakurze Impulse. Außerdem stammten in dieser Arbeit sowohl die Pumpimpulse als auch die verstärkten Impulse aus derselben Laserquelle. Es wird kein Verfahren zum Synchronisieren von langimpulsigen Pumpquellen und kurzimpulsigen Quellen vorgeschlagen. Es ist problematisch, Impulse aus einem herkömmlichen Q-geschalteten Pumpaser mit ultrakurzen Impulsen aus einer modenverriegelten Quelle zu synchronisieren.

40 Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, kompakte Verstärker für ultrakurze optische Impulse hoher Energie bereitzustellen.

Ferner soll die Erfindung Verstärker für ultrakurze Impulse ohne Beschränkungen der Pumpwellenlänge und der Verstärkungsbandbreite bereitstellen.

45 Weiter soll die Erfindung die Nutzung kompakter cw-oder gepulster Pumpquellen, wie beispielsweise Dioden-, Faser- oder Festkörper-Laser, ermöglichen, um wirkungsvoll optische parametrische Verstärker für die Verstärkung ultrakurzer Impulse zu pumpen.

Außerdem soll die Erfindung die Nutzung kompakter Quellen räumlicher Multimoden, wie beispielsweise Breitbereich-Dioden oder Diodenfelder, Multimodenkern-Faser-Laser und Verstärker, Mikrochip-Laserfelder oder andere 55 Multimoden-Festkörper-Laser, ermöglichen, um einen beugungsbegrenzten monomodalen Strahl parametrisch zu verstärken.

Darüber hinaus soll die Erfindung Verfahren und Einrichtungen zur korrekten zeitlichen Steuerung der Pumpe und der gestreckten ultrakurzen Impulse bereitstellen, um diese in einem parametrischen Verstärkungsmedium vorübergehend zu überlagern.

60 Die vorstehend genannte Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die kennzeichnenden Merkmale der Patentansprüche 1, 21, 32, 37 und 48 gelöst.

65 Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der beigefügten Unteransprüche.

In Übereinstimmung mit einem Gesichtspunkt der Erfin-

dung wird ein quasi-phasenangepaßtes nichtlineares Material als parametrisches Verstärkungsmedium zur parametrischen Chirpimpulsverstärkung (QPM PCPA) ultrakurzer Impulse verwendet. Die Phasenanpassungseigenschaften eines quasi-phasenangepaßten Materials werden während des Herstellungsprozesses zurechtgeschneidert, welches im wesentlichen die Aufhebung von Beschränkungen der Pumpwellenlängen und der erzielbaren Verstärkungsbandbreiten ermöglicht. Ferner erlaubt die Möglichkeit, die Phasenanpassungseigenschaften zurechtzuschneiden, die Auswahl von vorteilhaften Kristallgeometrien, welches eine Zunahme der Interaktionslänge durch Beseitigen des räumlichen Abwanderns von Strahlen und die Verwendung der höchsten in einem bestimmten optischen Material verfügbaren nichtlinearen Koeffizienten ermöglicht. Infolgedessen können die Pumpenergien, die zum Erzielen eines hohen Umwandlungswirkungsgrads und einer hohen Verstärkung in einem quasi-phasenangepaßten parametrischen Verstärker benötigt werden, im Vergleich zu einem herkömmlichen parametrischen Verstärker wesentlich verringert werden. Es erleichtert auch die Umwandlung eines multimodalen Pumpstrahls in einen beugungsbegrenzten Signalstrahl. Im allgemeinen erlaubt dies die effiziente Verwendung verhältnismäßig langer und multimodaler Pumpimpulse, die unter Verwendung einer Vielzahl von verhältnismäßig einfachen und kompakten diodengepumpten Quellen erhalten werden können. Dies ist bei Verwendung konventioneller nichtlinearer Kristalle, wie sie von Dubetis et al. beschrieben werden, nicht möglich.

In weiterer Übereinstimmung mit einem Gesichtspunkt der Erfindung wird ein allgemeines Verfahren zum Umwandeln der cw- oder gepulsten Leistung von monomodalen oder multimodalen Laserdioden in die verstärkte Energie von ultrakurzen optischen Impulsen beschrieben. Im allgemeinen wird diese Umwandlung in zwei grundlegenden Schritten erreicht. Zunächst wird Diodenlaser-Leistung entweder direkt oder durch Verwendung eines anderen Lasermediums derart in einen Hochenergie-Pumpimpuls einer geeigneten Dauer umgewandelt, daß Übereinstimmung mit der Dauer eines gestreckten Signalimpulses vorliegt. Der gestreckte Signalimpuls wird mittels einer Impulsstreckeinrichtung aus einem ultrakurzen Impuls erzeugt. Sodann wird das gestreckte Signal in einem nichtlinearen Kristall, der durch die Pumpsignalimpulse gepumpt wird, parametrisch verstärkt. Unter bestimmten Bedingungen wird der parametrische Verstärker auch für den räumlich multimodalen Pumpstrahl eine unverzerrte Verstärkung eines beugungsbegrenzten monomodalen Strahls bereitstellen. Das verstärkte Signal wird schließlich unter Verwendung einer Impulskompressoreinrichtung wieder auf die ultrakurze Dauer zurückkomprimiert.

Die Erfindung umfaßt ferner eine kompakte Anordnung zum Pumpen des parametrischen Verstärkers, Multimoden-kern-Fasern und Mikrochip-Festkörperlaser und Mikrochip-Festkörper-Laserfelder eingeschlossen.

Die Erfindung wird nachstehend anhand bevorzugter Ausführungsbeispiele unter Bezugnahme auf die beigelegte Zeichnung näher beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1 die Anordnung eines Verstärkungssystems in Übereinstimmung mit einem allgemeinen Ausführungsbeispiel der Erfindung;

Fig. 2 ein auf einer Multimoden-Faser basierendes parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel;

Fig. 3(a) ein Beispiel einer Pumpquelle unter Verwendung einer kaskadierten linearen Verstärkung;

Fig. 3(b) ein Beispiel einer Pumpquelle unter Verwendung einer Verstärkungsanordnung für mehrfachen Durch-

lauf;

Fig. 4(a) und **4(b)** passiv und aktiv Q-geschaltete Festkörper-Laser-basierte Systeme in Übereinstimmung mit einem zweiten Ausführungsbeispiel;

Fig. 4(c) ein Alexandrit-basiertes System in MOPA-Bauart gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel;

Fig. 4(d) eine regenerative Alexandrit-Verstärkeranordnung in Übereinstimmung mit dem vorgenannten weiteren Ausführungsbeispiel;

Fig. 5(a) ein Streifen- bzw. Fahnenbild des unverstärkten Signalstrahls, der durch das System gemäß dem Ausführungsbeispiel nach **Fig. 4(c)** erzeugt wird;

Fig. 5(b) ein Fahnenbild des durch das System gemäß diesem Ausführungsbeispiel erzeugten verstärkten Signalstrahls;

Fig. 5(c) ein Fahnenbild der Leerlaufphase des Systems gemäß diesem Ausführungsbeispiel;

Fig. 5(d) ein Fahnenbild des Pumpsignals des Systems gemäß diesem Ausführungsbeispiel; und

Fig. 6 ein Diagramm der Einzclimpuls-Autokorrelationen der verstärkten und nicht verstärkten Impulse des Systems gemäß dem Ausführungsbeispiel nach **Fig. 4(c)**.

Fig. 1 veranschaulicht die Anordnung eines allgemeinen Ausführungsbeispiels eines Verstärkungssystems in Übereinstimmung mit der Erfindung. Wie in **Fig. 1** gezeigt, umfaßt das Verstärkungssystem eine Pumpquelle **100** mit Pumpdioden **110** zum Pumpen einer Hochenergie-Impulsquelle **120**. Eine Signalquelle **130** umfaßt einen Oszillator **140**, der ultrakurze Impulse erzeugt, und eine Impulsstreckeinrichtung bzw. einen Impulsstrekcer **150**. Ein Strahleiter **160** wird zum Kombinieren der Pumpimpulse hoher Energie und der gestreckten ultrakurzen Impulse verwendet. Die kombinierten Signale werden an einen parametrischen Verstärker **170** angelegt, und das verstärkte Signal wird einer

Fig. 2 umfassen Wellenplatten **105** zum Festlegen der für effiziente nichtlineare gegenseitige Beeinflussungen erforderlichen Polarisationszustände und geeignete Fokussierungsoptiken **106**. Eine Triggerelektronik **190** ist zum Synchronisieren der Pumpimpulse und der ultrakurzen Impulse vorgesehen. Die Pumpsignalimpulse und die gestreckten Signalimpulse überlappen sich zeitlich und räumlich in dem nichtlinearen Kristall des parametrischen Verstärkers **170**.

Fig. 3 Die Verwendung der parametrischen Verstärkung stellt einige wichtige Vorteile bereit.

Erstens erlaubt sie die Auswertung bzw. Ausnutzung von multimodalen und langimpulsigen Pumpquellen. Im allgemeinen sind solche Pumpquellen viel weniger kompliziert und stellen wesentlich höhere Energien bereit als kompakte Quellen für die direkte Erzeugung und Verstärkung ultrakurzer Impulse.

Zweitens werden Beschränkungen der Verstärkungsbandbreite und Pumpwellenlänge, die bei Quantenverstärkern in-

55 härent vorhanden sind, durch Verwenden von quasi-phasenangepaßten nichtlinearen Werkstoffen bzw. Materialien vollständig beseitigt. Durch Verwenden von Chirp-Perioden-quasi-phasenangepaßten großvolumigen (Bulk-)Werkstoffen kann die Verstärkungsbandbreite auf eine beliebige benötigte Breite festgelegt werden. Die Pumpwellenlänge wird durch eine geeignete Quasi-Phasenanpaßperiode des parametrischen Verstärkers ausgewählt. Sofern

60 zweckmäßig, kann die Pumpwellenlänge so konvertiert werden, daß sie kürzer ist als das verstärkte Signal, indem eine zweite harmonische Erzeugung verwendet wird.

Drittens sind parametrische Verstärkungssysteme inhärent einfacher und kompakter. Die parametrische Verstärkung in einer einzelnen Stufe kann bis zu 90 dB Gewinn be-

reitstellen (die Grenze wird nur durch den Schwellenwert für optische parametrische Erzeugung (optical parametric generation, OPG) gebildet). Daher können, ausgehend von etwa 10 pJ als der mit einer beliebigen Faser-, Laserdioden- oder Festkörper-Oszillatoreinrichtung erzielbaren minimalen Energie, hohe Impulsenergien im Bereich zwischen 1 mJ und 1 J unter Verwendung von lediglich einer oder zwei Verstärkungsstufen erreicht werden. Demzufolge werden keine regenerativen Systeme oder Systeme für mehrfachen Durchlauf benötigt.

Damit ein solches Verstärkungssystem praktisch anwendbar ist, müssen die parametrische Verstärkung bzw. der parametrische Gewinn und die maximale Energieumwandlung von der Pumpe in das Signal in einem parametrischen Verstärker ausreichend hoch sein (näherungsweise 10 bis 50%). Diese Umwandlung wird durch die Spitzenintensität der Pumpe und die Eigenschaften des nichtlinearen Kristalls bestimmt.

Für birefringente bzw. doppelbrechende phasenangepaßte Kristalle erfordert eine solche Umwandlung sehr hohe Spitzenintensitäten, welche wesentlich höher sind als diejenigen, die praktisch mit einem multimodalen oder monomodalen Pumpimpuls von einer Dauer im Nanosekundenbereich aus einer kompakten, diodengepumpten Quelle erzielbar sind (> 100 mJ). In Übereinstimmung mit der Erfahrung kann unter Verwendung neuer quasiphasenangepaßter Werkstoffe (QPM-Werkstoffe), wie beispielsweise periodisch gepoltem Lithium-Niobat (periodically poled lithium niobate, PPLN), ein Nanosekunden-Ausgangssignal mit niedriger Intensität und niedriger Helligkeit aus einer Diodenlaser-gepumpten kompakten Quelle erfolgreich für die effiziente parametrische Verstärkung gestreckter ultrakurzer Impulse verwendet werden. Für eine weitergehende Diskussion periodisch gepolten Lithium-Niobats und verwandter Werkstoffe sowie deren Eigenschaften sei der Leser auf die nachstehenden Quellen verwiesen, welche jeweils gleichzeitig durch Bezugnahme hierin einbezogen werden: die US-Patentanmeldungen Nr. 08/763,381 und 08/789,995, welche die Verwendung von PPLN-Kristallen in Impulsverstärkungssystemen offenbaren; und Myers et al., "Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled lithium niobate", J. Opt. Soc. Am. B, 22, 2102 (1995).

Im Gegensatz zu traditionellen Chirpimpulsverstärkungssystemen, in welchen ultrakurze Impulse gestreckt werden, um nichtlineare Effekte zu eliminieren, erfordert dieser Ansatz die Streckung ultrakurzer Impulse nur für den Zweck der Maximierung des Wirkungsgrads der Extraktion aus dem langen Pumpimpuls. Im allgemeinen wird die Verwendung längerer Pumpimpulse und gestreckter Impulse höhere verstärkte Impulsenergien für eine gegebene Pumpimpuls-Spitzenintensität bereitstellen. Die maximal nutzbare Pumpimpulsdauer wird durch die Beschädigungsschwelle des nichtlinearen Kristalls und durch die maximal rekomprimierbare Impulsbreite für verstärkte Impfimpulse festgelegt. Beispielsweise sollte, um die Pumpintensitäten unter der Beschädigungsschwelle von periodisch gepoltem Lithium-Niobat zu halten, bevorzugt eine Pumpimpulsdauer unter 500 ps verwendet werden. Außerdem beschränken die existierenden Konstruktionen von Impulsstreckern und Kompressoren die Dauer gestreckter Impulse auf eine Größenordnung im Nanosekundenbereich. Dies schränkt die potentiell nutzbare Pumpimpulsdauer auf innerhalb den Bereich zwischen 100 ps und einigen wenigen Nanosekunden ein. Derartige Impulse können mit einer Vielzahl von passiv oder aktiv Q-geschalteten Systemen oder Hauptoszillatoren-Leistungsverstärker-Systemen (Master Oszillator Power Amplifier-Systemen bzw. MOPA-Systemen), wie beispiels-

weise Laserdioden-gepumpten Nd:YAG- oder Alexandrit-Systemen, kompakten Laserdioden-gepumpten Mikrolasern oder verstärkten Fasersystemen, erhalten werden. Bereitstellbare Pumpenergien liegen in dem Bereich zwischen 5 1 µJ bis hin zu mehr als 1 J und ermöglichen verstärkte Signallimpulse in demselben Bereich.

Der Oszillator 140 kann ein modenverriegelter Laser, ein verstärkungsgeschalteter bzw. gewinngeschalteter oder ein schnellfrequenzmodulierter Halbleiterlaser sein. Im letzteren Fall kann der Oszillator gestreckte Impulse direkt erzeugen und auf diese Art und Weise die Notwendigkeit eines Impulsstreckers beseitigen.

Eine Vielzahl von im Stand der Technik bekannten unterschiedlichen Einrichtungen sind für die Verwendung als Impulsstretcher 150 und Kompressor 180 geeignet. Beispielsweise können Beugungsgitter-basierte Einrichtungen, Fasergitter oder hybride Kombinationen (z. B. eine Faser oder ein Fasergitter als Strecker und ein Beugungsgitterpaar als Kompressor) verwendet werden. Im allgemeinen sind jedoch die maximalen Dauern gestreckter Impulse aus existierenden praktischen Impulsstreckern auf einen näherungsweise Nanosekunden-Bereich begrenzt. Um den Wirkungsgrad der parametrischen Verstärkung zu maximieren und schädliche Effekte wie beispielsweise eine Kristallbeschädigung zu minimieren, sollten die Pumpimpulsdauern mit denjenigen des Signalimpulses übereinstimmen. Demzufolge schließen für die hierin beschriebene Erfahrung die relevantesten Pumpimpulsdauern den Nanosekunden- und den Subnanosekundenbereich ein.

Ein wichtiger Gesichtspunkt der Erfahrung besteht darin, daß die praktischen Vorteile des Verstärkungssystems wesentlich durch die vorteilhaften Eigenschaften der verwendeten Pumpimpulsketten bestimmt werden. Weil ein quasiphasenangepaßtes parametrisches Medium eine Reduktion der erforderlichen Pumpenergien, vergrößerte Impulslängen und die Verwendung von multimodalen Pumpstrahlen erlaubt, werden eine Vielzahl praktischer Pumpquellen für die Anwendung verfügbar. Die Erfahrung umfaßt infolgedessen besondere Ausführungsbeispiele auf der Grundlage verschiedener Pumpquellen.

In Übereinstimmung mit einem ersten Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 2 wird die Erfahrung in Form eines Multimoden-Faser-basierten Chirpimpulsverstärkungssystems (parametric chirped pulse amplification system, PCPA-System) implementiert.

Die Verwendung eines Faser-Verstärkungsmediums in einem PCPA-System führt zu den nachstehenden Überlegungen. Wie vorstehend beschrieben, legen die kleinen Querabmessungen eines Faser-Verstärkungsmediums die Beschränkungen für die maximale Impulsenergie fest. Damit ein Signal monomodal ist (d. h. eine gaußsche räumliche Verteilung am Ausgang der Faser aufweist), beträgt der maximale Querschnittsdurchmesser des Faserkerns etwa 15 µm. Ein monomodaler Kern mit größerem Durchmesser würde einen unrealistisch kleinen Brechungsindex-Unterschied zwischen dem Kern und der Hülle bzw. Umhüllung erfordern und auch zu nicht tolerierbar hohen Biegeverlusten führen. Für ein Er-dotiertes Faser-Verstärkungsmedium legt dies die maximal erhaltbare Impulsenergie auf näherungsweise das 100 µJ-Niveau.

Unter Zurückgreifen auf multimodale Faser-Verstärker ist es möglich, wesentlich größere Kerndurchmesser zu verwenden. Mit multimodalen Verstärkern mit 30 µm bis 100 µm Kerndurchmesser ist es möglich, Impulsenergien im Bereich zwischen 100 µJ bis 10 mJ zu erreichen. Jedoch ist die Verwendung von multimodalen Faser-Verstärkern zur konventionellen Chirpimpulsverstärkung von Femtosekunden-Impulsen durch eine hohe Zwischenmodendispersion

(zwischen etwa 1 und 10 ps/m) praktisch ausgeschlossen, welches zu gravierenden zeitlichen Verzerrungen von komprimierten Impulsen führt. Ein weiterer wesentlicher Nachteil bei der direkten Erzeugung ultrakurzer Impulse mit einer multimodalen Faser ist das nicht gaußförmige Profil des multimodalen Strahls, welches wesentlich die Helligkeit und die räumliche Kohärenz des Strahls verringert.

Diese Beschränkungen von multimodalen Faser-Verstärkern können durch Verwenden einer multimodalen Faser als Pumpe für einen parametrischen Verstärker von gestreckten ultrakurzen Impulsen anstelle für eine direkte Chirpimpulsverstärkung überwunden werden.

Wie in Fig. 2 gezeigt, umfaßt ein Multimoden-Faser-basiertes PCPA-System eine Signalquelle 200, die gestreckte ultrakurze Impulse bereitstellt, eine Pumpquelle 210, die lange Pumpimpulse hoher Energie bereitstellt, einen parametrischen Verstärker 220, einen Impulskompressor 230 und eine Triggerelektronik 240, die die Pumpsignale und die verstärkten Signale synchronisiert.

Die Signalquelle 200 umfaßt einen modenverriegelten Oszillator 202 (beispielsweise einen modenverriegelten Faser-Oszillator) und einen Impulsstrekker 204. Alternativ kann die Signalquelle eine (nicht gezeigte) schnell abstimmbare Laserdiode umfassen, die gestreckte Impulse mit breiter Bandbreite direkt erzeugt. Eine Vielzahl von möglichen Strecken- und Kompressoranordnungen ist verfügbar, wie vorstehend beschrieben wurde.

Die Pumpquelle 210 umfaßt Mehrstufen- oder Mehrdurchlauf-Faser-Verstärker 212 und 214, die durch eine Laserdiode 216 geimpft und durch Dioden 218 gepumpt werden. Wird die Impfdiode 216 mit der Triggerelektronik 240, die beispielsweise ein üblicher Generator für elektrische Impulse sein kann, gepumpt, können die optischen Impfimpulse auf jede beliebige Dauer – beginnend bei etwa 100 ps und länger – zugeschnitten werden. Das Hauptoszillator-Leistungsverstärker-System (MOPA) erlaubt die Erzeugung von Pumpimpulsen jeder beliebigen Dauer und mit einer benötigten Wiederholrate. Wichtig ist, daß dieses Schema die Synchronisation von Pumpimpulsen mit den gestreckten ultrakurzen Impulsen mit vernachlässigbaren Synchronisationsstörungen erlaubt. Beispielsweise kann ein Generator für elektrische Nanosekunden-Impulse durch eine schnelle Photodiode über die Kette der ultrakurzen Impulse getriggert werden. Zeitsteuer-Synchronisationsstörungen bzw. Timing-Jitter der erzeugten Pumpimpulse in Bezug auf die gestreckten Impulse können weniger als 30 ps betragen, welches nur ein Bruchteil der Dauer der Pumpimpulse ist.

Mehrachtdurchgang- oder Mehrfachstufen-Faser-Verstärker sind in der Pumpquelle erforderlich, um bis zu 90 dB Gewinn bereitzustellen, damit ausgehend von einem typisch näherungsweise 10 pJ-Ausgangssignal einer Laserdiode 216 Millijoule-Impulse erreicht werden. Der typische Gewinn bei einem Durchgang beträgt in einem Er-dotierten Faser-Verstärker 20 bis 30 dB. Demzufolge sind 4 bis 5 Verstärkungsstufen notwendig, um die gewünschten Energiepegel zu erreichen. Ein Entwurfsbeispiel, in welchem kaskadierte lineare Verstärker verwendet werden, ist in Fig. 3(a) gezeigt. Akusto-optische Modulatoren 300 zwischen den Stufen sind notwendig, um eine Kreuzsättigung zwischen den Stufen aufgrund verstärkter spontaner Emission (amplified spontaneous emission, ASE) zu vermeiden. Die gesamte Kette kann aus Multimode-Fasern bestehen. Alternativ können in den ersten Stufen, in welchen die Impulsenergie noch gering ist, Monomode-Fasern und nur in der letzten Stufe bzw. den letzten Stufen Multimode-Fasern verwendet werden. Im Hinblick auf die letzte Stufe ist es vorteilhaft, hoch dotierte Fasern zum Minimieren der Länge und der nichtlinearen Effekte im Kern zu verwenden. Nichtlineare

Effekte verringern den Wirkungsgrad der Verstärker und führen zu einer spektralen Verbreiterung des Pumpimpulses, welches zum Pumpen nichtlinearer Kristalle unerwünscht ist.

Der "lineare" Ansatz des Kaskadierens von Faserverstärkern, der in Fig. 3(a) gezeigt ist, zeigt gewisse Wirtschaftlichkeitsmängel dahingehend, daß die Kosten und die Größe der Pumpquelle proportional zu der Anzahl von Stufen sind. Eine vorteilhafte alternative Lösung besteht darin, eine Anordnung mit mehrfachen Durchläufen bzw. Durchgängen zu verwenden, beispielsweise eine solche, wie sie in Fig. 3(b) gezeigt ist. In diesem Fall sind eine oder maximal zwei Verstärkungsstufen ausreichend. Der akusto-optische Modulator 301 arbeitet als Schalter, der Impfimpulse in den Verstärker injiziert und diese erst dann in den Ausgang leitet, nachdem die ausreichenden Energien nach einigen Durchläufen erreicht sind. Typisch muß die Modulatorgeschwindigkeit (Torbreite) 100 bis 200 ns betragen, um mit der Umlaufzeit eines typischen Faserverstärkers 212c (näherungsweise 10 bis 50 ns) übereinzustimmen. Weil akusto-optische Modulatoren im allgemeinen polarisationsunempfindlich sind, können für eine derartige Anordnung für mehrfachen Durchlauf sowohl monomodale als auch multimodale Fasern eingesetzt werden. Aufgrund der geringen mittleren Leistung eines Impfsignals sind zweistufige Systeme vorteilhaft, in welchen eine der Stufen ein linearer Verstärker und eine weitere Stufe ein Verstärker für mehrere Durchläufe sind.

Faserverstärker können durch monomodale Diolen wie beispielsweise Hauptoszillator-Leistungsverstärker-Laserdioden gepumpt werden; jedoch sind monomodale Quellen teurer und stellen vergleichsweise geringere Leistung bereit. Es wird daher bevorzugt, Quellen mit mehreren Moden oder Quellen mit mehreren Diolen zu verwenden. Dies kann durch eine Doppelhüllengeometrie von sowohl monomodalen als auch multimodalen Faser-Verstärkern dargestellt werden. Wichtig ist hierbei, daß der große Kernbereich einer multimodalen Faser die Pumpabsorption beim Hüllpumpen im Vergleich zu einer doppelhülligen Monomodalkernfaser erleichtert. Außerdem können, was multimodale Fasern mit einem ausreichend großen Kerndurchmesser (typisch > 100 µm) anbelangt, breitstreifige oder multimodale Diodenlaser zum direkten Pumpen im Kern verwendet werden. Im allgemeinen ist die Verwendung von multimodalen Laserdioden sehr vorteilhaft zum Erzielen sehr kompakter und robuster Anordnungen der Pumpquelle und demzufolge des gesamten Systems.

Die Pumpwellenlänge eines parametrischen Verstärkers muß kürzer sein als die Signalwellenlänge. Falls Faser-Verstärker, die die Pumpquelle bilden, bei einer kürzeren Wellenlänge als die Impulsquelle für ultrakurze Impulse arbeiten, dann besteht das einzige Erfordernis darin, die geeignete Phasenanpassung in einem parametrischen Kristall durch Wählen des zweckmäßigen nichtlinearen Materials (beispielsweise Auswählen eines geeigneten Werts für die Quasi-Phasenanpaßperiode in einem periodisch gepolten Lithium-Niobat-Kristall) zu erzielen. Ein Beispiel besteht in einem Femtosekunden-Oszillator, der auf einer Er-dotierten Faser (Betriebswellenlänge bei 1550 nm) und einer Pumpquelle, die eine Nd-dotierte Glasfaser (Betriebswellenlänge bei 1060 nm) verwendet, basiert. Falls sowohl die Pumpe als auch die Signalquelle dieselbe Art dotierter Fasern verwenden (d. h. falls beispielsweise eine Er-dotierte Faser verwenden), ist es erforderlich, die Frequenz des Pumpstrahls mittels Quasi-Phasenanpaß-Frequenzverdopplern oder anderen bekannten Frequenzverdopplern 260 zu verdoppeln. Außerdem ist es vorteilhaft, die Pumpquelle mit einer geringfügig kürzeren Grundwellenlänge als der des Signals zu betreiben (beispielsweise etwa 1530 nm bzw. etwa

1560 nm), um eine phasenempfindliche parametrische Verstärkung bei der Degeneration zu vermeiden.

Der parametrische Verstärker 220 besteht aus einer oder mehreren Verstärkerstufen. Bevorzugt werden zwei Stufen 220A und 220B verwendet (Fig. 2). Die Verwendung einer Doppelstufe anstelle einer einzelnen Stufe vereinfacht es, mehr als 90 dB Verstärkung der gestreckten Impulse (von etwa 10 pJ bis auf etwa 10 mJ) zu erzielen. Der maximale Gewinn in einem parametrischen Verstärker wird durch den Beginn einer parametrischen Verstärkung begrenzt. Dies tritt in einer einzelnen Stufe bei etwa 90 dB Gewinn auf, welches ausreichend ist, um spontane Vakuumfluktuationen auf das makroskopische Niveau zu verstärken. Typisch wird der Ausgang einer multimodalen Faser unpolarisiert sein. In diesem Fall umfaßt die bevorzugte Anordnung zur Implementierung einer zweistufigen parametrischen Verstärkung polarisierende Strahlteiler 250 am Ausgang der Pumpquelle 210 zum Erzeugen zweier Pumpkanäle, d. h. einen für jede parametrische Verstärkungsstufe 220A bzw. 220B. Diese Anordnung gewährleistet die Nutzung der gesamten Pumpleistung.

Weitere Komponenten zur Implementierung des Systems umfassen dichroitische Spiegel 221 zum Kombinieren von Pump- und Signalstrahlen, Wellenplatten 222 zum Festlegen der für effiziente nichtlineare gegenseitige Beeinflussungen benötigten Polarisationszustände, sowie geeignete Fokussierungsoptiken 223. Das Femtosekunden-Signal sollte vor der Verstärkung auf näherungsweise dieselbe Dauer wie die des Pumpimpulses gestreckt werden. Die Pump- und Signalimpulse müssen innerhalb des parametrischen Verstärkerkristalls 224 sowohl zeitlich als auch räumlich überlagert werden. Um eine Kristallbeschädigung zu vermeiden, muß die Spotgröße ausreichend groß sein.

Der parametrische Kristall 224 weist bevorzugt eine hohe Nichtlinearität auf, beispielsweise wie dies in PPLN-, PPLT- oder anderen quasi-phasenangepaßten Werkstoffen der Fall ist, um eine effiziente Verstärkung mit Spitzenintensitäten unter der Beschädigungsschwelle zu erzielen. Eine große Spotgröße ist ferner zum Erreichen einer parametrischen Verstärkung mit hohem Wirkungsgrad unter Verwendung eines räumlich multimodalen Pumpstrahls vorteilhaft. Die Verwendung eines nichtlinearen Kristalls mit hohem Wirkungsgrad wie beispielsweise PPLN ist für die Verwirklichung eines faserbasierten Systems wesentlich. Mit den gegenwärtig verfügbaren konventionellen Doppelbrechungsanangepaßten Kristallen sind die erforderlichen Spitzenleistungen auch für multimodale Fasern mit großen Kernen nicht tolerierbar.

Wie aus der vorstehenden Beschreibung hervorgeht, besitzt die Verwendung eines Faser-Verstärkers als Pumpquelle anstatt zur direkten Verstärkung gestreckter Femtosekunden-Impulse diesen Effekt der Zwischenmodendispersion sowie die geringe Strahlqualität des Multimoden-Ausgangs eines Hochenergie-Faser-Verstärkers und stellt einen monomodalen und transformationsbegrenzten Ausgang bei hohen Impulsenergien bereit.

Wie vorstehend beschrieben ändern sich die erzielbaren maximalen Energien größenmäßig mit der Größe des Kerns der Multimode-Faser. Mit einer Faser mit einem etwa 100 µm großen Kern sind mehr als 10 mJ erzielbar. Unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade der Frequenzverdopplung und der parametrischen Verstärkung sind Impulse von 10 mJ zum Erhalten von verstärkten Impulsen mit mehr als 1 mJ ausreichend. Darüber hinaus ist unter Verwendung noch größerer Fasern eine Energieskalierung möglich. Alternativ können Ausgangsimpulsenergien durch Kombinationen der Ausgänge mehrerer Pumpquellen skaliert werden.

In Übereinstimmung mit einem weiteren beispielhaften

Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 4(a) und 4(b) wird die Erfindung unter Verwendung eines Q-geschalteten Festkörper-Lasersystems implementiert.

Mehrere Festkörpermaterialien können laserdioden gepumpt werden wodurch es möglich wird, kompakte und robuste Festkörper-basierte Quellen zum Pumpen eines parametrischen Verstärkers für gestreckte Impulse zu entwerfen.

Die Q-Schaltung ist das gut etablierte Verfahren, welches die Erzeugung von Impulsen mit hoher Spitzenleistung erlaubt. Der Q-Parameter eines optischen Resonators ist als das Verhältnis von in dem Resonator gespeicherter Energie zu derjenigen, die pro Umlauf verloren wird, definiert. Er kann durch Variieren der Verluste in dem Resonator variiert werden. Es gibt zwei Verfahren zum Variieren von Verlusten: die aktive Q-Schaltung und die passive Q-Schaltung. Die aktive Q-Schaltung erfordert einen aktiven Modulator in dem Resonator (beispielsweise eine Pockels-Zelle). Der Vorteil aktiv Q-geschalteter Laser besteht darin, daß diese von außen getriggert werden können. Die passive Q-Schaltung kann unter Verwendung einer passiven Einrichtung wie beispielsweise einem sättigbaren Absorber implementiert werden. Ein wesentlicher Nachteil von passiv Q-geschalteten Lasern besteht darin, daß deren Triggerung nicht von außen bzw. extern gesteuert wird und die Impuls-zu-Impuls-Synchronisationsstörungen bzw. -Jittererscheinungen einen großen Wert annehmen, der die Dauer des Impulses selbst überschreiten kann. Dieses Merkmal führt dazu, daß die Synchronisation zwischen einem modenverriegelten Laser und einem passiv Q-geschalteten Laser zu einem ernsten Problem wird. Die Erfinder haben jedoch festgestellt, daß dieses Problem vermieden werden kann und daß die Energie von passiv Q-geschalteten Lasern für ein parametrisches Verstärkungssystem genutzt werden kann, vorausgesetzt daß ein von außen synchronisierbarer Laser, wie beispielsweise eine schnell-abgestimmte Laserdiode, als Quelle gestreckter, breitbandiger Impulse verwendet wird. Eine solche Laserdiode kann auf einfache Art und Weise durch entweder einen passiv oder aktiv Q-geschalteten Laser mit vernachlässigbaren Zeitsynchronisationsstörungen getriggert werden. Im allgemeinen kann anstelle der schnell-abgestimmten Diode ein beliebiger von außen synchronisierbarer Laser (beispielsweise eine verstärkungsgeschaltete Laserdiode) verwendet werden.

Ein Beispiel für ein derartiges, einen Q-geschalteten Festkörperlaser verwendendes Ausführungsbeispiel ist in Fig. 4(a) gezeigt. Eine Pumpquelle 710 umfaßt eine passiv Q-geschaltete Impulsquelle 715, welche durch Pumpdioden 716 gepumpt wird. Eine Elektronik 700 für abstimmbare Dioden, die eine abstimmbare Laserdiode 740 steuert, wird durch einen kleinen Bruchteil des optischen Ausgangs der passiv Q-geschalteten Impulsquelle 715 (für Impulse mit hoher Energie ist etwa 1% ausreichend), der mit einer schnellen Photodiode 720 erfaßt wird, getriggert.

In Fällen, in welchen es erforderlich ist, die inakzeptabel große Verzögerung der Dioden-Ansteuerelektronik zu kompensieren, kann der Pumpimpuls in eine Verzögerungsleitung, die hier in einer Multimode-Faser 730 implementiert ist, ausgegeben werden. Die Größe des Kerns der Faser muß ausreichend groß sein, um nichtlineare Verzerrungen zu vermeiden und einen guten Wirkungsgrad für die Einkopplung in die Faser zu erzielen. Die Verwendung dieser Faser erleichtert die Implementierung des vorliegenden Ausführungsbeispiels, ist jedoch nicht wesentlich.

Die Implementierung einer aktiv Q-geschalteten Pumpquelle ist in Fig. 4(b) gezeigt. Eine derartige Pumpquelle 715 kann von außen mit vernachlässigbaren Synchronisationsstörungen getriggert werden und erlaubt infolgedessen die Verwendung einer modenverriegelten Signalquelle 705.

In beiden **Fig. 4(a)** und **4(b)** können, um die Pumpimpulsenergie zu erhöhen, Q-geschaltete Impulse in einem (nicht gezeigten) Festkörperverstärker weiter verstärkt werden.

Ein besonders attraktives Konzept zur Herstellung kompakter Q-geschalteter Festkörperlaser ist der Mikrochip-Laser, der die Verwendung eines Halbleiterpackverfahrens mit sich bringt. Tausende von Halbleiterlasern können aus einem Wafer oder einem Festkörper-Laser-Werkstoff durch Polieren derart, daß die beiden Oberflächen eben und parallel sind, nachfolgendes Beschichten dieser Oberflächen mit dielektrischen Spiegeln und Zerschneiden des Wafers in einzelne Chips unter Verwendung von Standard-Halbleiter-Schneideverfahren fabriziert werden. Solche "Chip-Laser", welche etwa 1 bis 3 mm³ groß sind, können mit monomodalen oder multimodalen Laserdioden oder Diodenfeldern gepumpt werden. Typische Werkstoffe für Mikrochip-Laser sind Nd-dotiert, wie beispielsweise YAG, mit Betriebswellenlängen bei 1064 nm und 1319 nm und Pumpung durch Laserdioden bei etwa 809 nm. Die Q-Schaltung wird durch Bonden entweder eines elektro-optischen (aktive Einrichtung) oder eines sättigbaren (passive Einrichtung) Absorbermediums auf Nd:YAG- oder Nd:VO₄-Mikrochips, um einen zusammengesetzten Resonator, erzielt. Der Q-geschaltete Ausgang eines einzelnen Mikrochip-Lasers kann bis zu einigen zehn Mikrojoule groß sein, mit Dauern zwischen hunderten von Picosekunden bis hin zu Nanosekunden, beispielsweise zwischen 200 ps und 5 ns. Die Verwendung von Mikrochip-Lasern erlaubt sehr preiswerte und kompakte Mikrojoule-Femtosekunden-Impulsquellen. Ferner kann durch Verwenden von Mikrochip-Laserfeldern eine Leistungs- und Energieskalierung erreicht werden, so daß Ausgangsenergien von bis zu etwa 100 mJ möglich sind.

Die Verwendung eines quasi-phasenangepaßten parametrischen Kristalls in Übereinstimmung mit der Erfindung erlaubt die Verwendung kompakter Quellen wie beispielsweise Mikrochip-Lasern, welche verhältnismäßig geringe Ausgangsenergien erzeugen, als Pumpen für ein PCPA-System. Demgegenüber kann bei Verwendung konventioneller nichtlinearer Werkstoffe (wie beispielsweise BBO) auch die scharfe Fokussierung des Pumpstrahls keine ausreichende Verstärkung für eine effiziente Leistungsumwandlung bereitstellen.

In Übereinstimmung mit einem weiteren Ausführungsbeispiel gemäß **Fig. 4(c)** und **4(d)** wird die Erfindung in Form eines festkörperbasierten PCPA-Systems implementiert.

Wie vorstehend beschrieben, wurde im Stand der Technik unter Verwendung eines konventionellen birefringenten phasenangepaßten BBO-Kristalls in einer nichtkollinearen Konfiguration mit 3 mJ-Pumpimpulsen von etwa 5 ps Dauer ein Energieumwandlungswirkungsgrad von 1 : 30 erreicht. Um jedoch Nanosekunden-Pumpimpulse mit denselben erforderlichen Spitzenleistungen nutzen zu können, müßten die Pumpenergien um den Faktor 100 bis 1000 erhöht werden. Dies würde die Verwendung von Impulsquellen mit Ausgangsenergien auf Joule-Niveau erfordern. Gegenwärtig sind, wie dem Fachmann bekannt ist, solche Systeme groß, sperrig und teuer. Außerdem liegen die Pulsegiedichten solcher Quellen typisch oberhalb der Beschädigungsschwelle des nichtlinearen Mediums. Die Verwendung von quasi-phasenangepaßten Werkstoffen in Übereinstimmung mit der Erfindung verringert die Anforderung an die Pumpenergien nach unten auf die Mikrojoule- und Millijoule-Niveaus, und verringert dementsprechend die Leistungsdichten auf Niveaus unterhalb der Beschädigungsschwelle des nichtlinearen Kristalls. Auf diesem Energieniveau gibt es eine Vielzahl von praktisch darstellbaren Festkörpersystemen, welche die erforderlichen Pumpimpulse für ein PCPA-

System bereitstellen können.

MOPA-Systeme, die grundlegend ähnlich den vorstehend beschriebenen Systemen sind und einen Faser-Versiärker verwenden, können ebenfalls mit großvolumigen (Bulk-)Festkörper-Werkstoffen implementiert werden. Jedoch werden hier aufgrund der geringen Verstärkung eines Festkörper-Mediums bei einmaligem Durchlauf Systeme mit mehreren Durchläufen oder regenerative Systeme bevorzugt.

- 10 Eine allgemeine Anordnung eines Alexandrit-basierten Systems in MOPA-Bauart ist in **Fig. 4(c)** gezeigt. Ein durch eine Lampe gepumpter Multimode-Alexandrit-Laser wird als Pumpaser 420 für einen regenerativen Alexandrit-Versiärker 410, der bei Wellenlängen zwischen 780 nm und 800 nm arbeitet, verwendet (**Fig. 4(d)**). Der Versiärker wird mit Impulsen variabler Dauer aus einer Standard-Halbleiter-laser-Impfdiode 430 bei 786 nm geimpft. Die Dauer der Diodenimpulse wird durch die Dauer elektrischer Impulse aus einem Standard-Nanosekunden-Impulsgenerator einer Triggerelektronik 400 bestimmt. Die Wiederholrate des Alexandrit-Systems beträgt 10 Hz. Es wurde festgestellt, daß der verstärkte Ausgang Impulse mit einer Dauer zwischen 350 ps und 1 ns (wie durch die Impfdauer festgelegt) und Energien von bis zu 8 mJ bereitstellt. Der Resonator wird nach einer festen Anzahl von Umläufen abgeschaltet. In Verbindung mit der Tatsache, daß die Impfdiode von außen getriggert wird, erleichtert dies die zeitliche Steuerung des Pumpimpulses über den Signalimpuls stark.

Eine Signalquelle 440 ist ein verstärktes Er-dotiertes Faser-Laser-System, welches bei einer Wellenlänge von etwa 1550 nm arbeitet. Femtosekunden-Impulse aus einer passiv modenverriegelten Er-dotierten Faser-Laser-Quelle 445 werden in einem Beugungsgitter-Strecker mit positiver Streuung 450 gestreckt und in einer Kette von diodengepumpten Er-dotierten Faser-Versiärkern (nicht gezeigt) verstärkt. Nach der Verstärkung werden Impulse mit einer Bandbreite von etwa 7 nm (festgelegt durch die Gewinnverschmälerung) und einer Dauer von 300 bis 350 ps erhalten. Dieses System kann Impfimpulse mit Energien von bis zu 10 µJ bereitstellen. Derart hohe Energien werden zweckmäßig verwendet, um mit einem parametrischen Versiärker mit einer Stufe zu arbeiten. Die Verstärkung des direkten Ausgangs des Oszillators und des Impulsstreckers würde im allgemeinen zwei parametrisch verstärkende Stufen erfordern, um Energien im Millijoule-Bereich zu erreichen. Verglichen mit Quantenversiärkern können parametrische Versiärker mit wesentlich geringeren Energien geimpft werden. Die Ursache hierfür ist, daß im Gegensatz zu der spontanen Emission eines Quantenversiärkers die injizierten Impulse niedriger Energie in einem parametrischen Kristall mit Vakuumfluktuationen zu kämpfen haben.

Die Pump- und Signalimpulse werden in einem IR-Strahlteiler 460 für eine kollinare Fortpflanzung kombiniert. Beide Strahlen werden in eine Probe eines periodisch gepolten Lithium-Niobat (PPLN)-quasi-phasenangepaßten (QPM)-Kristalls 470 fokussiert. Die Dicke des Kristalls beträgt 0,5 mm, und eine Vielzahl von Längen desselben liegen zwischen 3 und 5 mm. Es können auch noch längere Kristalle verwendet werden, welches die erforderlichen Pumpenergien weiter verringern und Probleme hinsichtlich einer Beschädigung des Kristalls umgehen würde. Die Quasi-Phasenanpaßperiode des PPLN-Kristalls in dieser bestimmten Implementation beträgt 19,75 µm. Im allgemeinen kann die Quasi-Phasenanpaßperiode bzw. QPM-Periode Λ für eine gegebene gegenseitige Beeinflussung unter Verwendung der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{n_p}{\lambda_p} - \frac{n_s}{\lambda_s} - \frac{n_i}{\lambda_i}$$

Hierin sind n_k und λ_k die Brechungsindizes und Wellenlängen bei der Pump-, Signal- bzw. Leerlaufwellenlänge. Aus dieser Gleichung ist offenbar, daß die Pumpwellenlänge durch Wählen der geeigneten Quasi-Phasenanpaßperiode für den parametrischen Verstärker ausgewählt werden kann. Außerdem ist aus dieser Gleichung klar ersichtlich, daß falls die Quasi-Phasenanpaßperiode entlang des optischen Pfads gechirped, d. h. vor der Verstärkung expandiert und dann wieder rekompriert wird, dieses effektiv die Phasenanpaßbandbreite für eine gegebene nichtlineare gegenseitige Beeinflussung verbreitert. Die gewählte Geometrie des Kristalls stellt eine unkritische Phasenanpassung bereit und eliminiert auf diese Art und Weise die räumliche Strahlabwanderung. Ein optimaler Umwandlungswirkungsgrad von Pumpe zu Signal ist kritisch abhängig von der räumlichen Überlappung und der Kollinearität der Pump- und Impfstrahlen in dem Kristall. Die Pump- und Signal-Spotgrößen-durchmesser können beispielsweise in dem Bereich zwischen 300 und 400 μm liegen. Große Spotdurchmesser am Kristall sind wesentlich für sowohl die Verhinderung einer Kristallbeschädigung als auch für die räumliche Übereinstimmung von multimodalen und monomodalen Profilen von Pump- und Signalstrahlen. Keine spezielle Vorsorge braucht getroffen zu werden, um die Wellenfrontkrümmungen der Pump- und Signalstrahlen in dem Kristall anzupassen. Die verstärkten Impulse werden mit einem Standard-Beugungsgitter-Kompressor mit negativer Dispersion 480 rekompriert.

Ein maximal verstärkter Signalausgang von 1 mJ wurde bei 5 mJ Pumpeingang und 100 nJ Signaleingang experimentell beobachtet. Ein Kleinsignalgewinn von 10^4 wurde für Eingangs impulsenergien von 5 nJ und weniger gemessen. Als Pumpe-zu-Signal-Umwandlungswirkungsgrad wurden bis zu 35% festgestellt. Obwohl der Pumpstrahl in diesem Ausführungsbeispiel monomodal ist, sind die Pumpbedingungen äquivalent zu dem Pumpen mit einem multimodalen Strahl aufgrund der Fehlanpassung bzw. fehlenden Übereinstimmung zwischen den Wellenfront-Krümmungen und aufgrund von großen Dimensionen beider Strahlen in dem parametrischen Kristall. Für große Spotgrößen und hohe Modenzahlen ist die räumliche Fehlanpassung zwischen monomodalen und multimodalen Strahlprofilen vernachlässigbar.

Die Materialeigenschaften von Lithium-Niobat erlauben eine effiziente parametrische Umwandlung bei Pumpintensitäten unterhalb der Kristallbeschädigungsschwelle. Für Pumpimpulsdauern zwischen 300 ps und 500 ps, wie sie für die Verstärkung verwendet werden, wurde auch bei den maximalen Pumpenergien von 8 mJ keine Beschädigung beobachtet. Für Pumpimpulsbreiten länger als 1 ns wurde jedoch eine optische Beschädigung der Eingangsfläche des parametrischen Kristalls bei etwa 2 mJ/Impuls, entsprechend einer Intensität von $3,8 \text{ GW/cm}^2$, beobachtet. Bei längeren Impulsbreiten, beispielsweise 5 ns, wurde bei noch geringeren Spitzenintensitäten von $0,8 \text{ GW/cm}^2$, die nur vernachlässigbaren parametrischen Gewinn erzeugen konnten, eine Oberflächenbeschädigung beobachtet. Die beobachtete Abhängigkeit der Schadenschwelle von der Dauer der Pumppulse ist mit der Oberflächenbeschädigung von Bulk-LiNbO₃ aufgrund der thermischen Wirkungen verträglich. Dies zeigt an, daß ein Pumpen mit Impulsen kürzer als 1 ns für LiNbO₃-Kristalle vorteilhaft ist zum Erhalten des höchsten parametrischen Verstärkungsfaktors und Umwand-

lungswirkungsgrads.

Im allgemeinen können für eine gegebene Impulsdauer die nutzbaren Pumpenergien (und demzufolge die erhaltbaren Signalenergien) durch proportionales Anpassen des 5 Spotbereichs nach oben oder unten skaliert werden. Dies erhält die feste Pumpintensität. Die einzige praktische Beschränkung bezüglich der erhaltbaren maximalen Energien wird durch die maximalen Querabmessungen des parametrischen Kristalls festgelegt. Gegenwärtig ist aufgrund der 10 Festlegung durch Beschränkungen des Polens elektrischer Felder 0,5 mm dickes periodisch gepoltes Lithium-Niobat die Norm. Die Skalierung der Spotgröße über diese Grenze hinaus würde eine asymmetrische Strahlexpansion erfordern, um die unbeschränkte Breite des Kristalls zu nutzen. 15 Jedoch kann die Dicke des quasi-phasenangepaßten Kristalls auf ein erforderliches oder gewünschtes Maß erhöht werden, beispielsweise durch Verwenden eines diffusionsgebundenen vertikalen Stapels von PPLN-Platten.

Es ist wichtig, zu überprüfen, daß eine parametrische 20 gegenseitige Beeinflussung zwischen der Pumpe und dem Signal keine Phasenverzerrungen in dem verstärkten gestreckten Impuls induziert. Um den Chirp auf dem verstärkten Ausgang zu charakterisieren, wurde der wieder parallel gerichtete Ausgang in einem Gitter-Monochromator spektral 25 gestreut und dann mit einer Fahnenkamera gemessen. Die Fahnenkamerabilder des unverstärkten Signalstrahls zeigten einen linearen Chirp an (Fig. 5(a)); dieser Chirp wurde vollständig auf das verstärkte Signal übertragen (Fig. 5(b)), welches in einer Bandbreite von 7 nm resultierte. Der Chirp 30 (nichtlinear) des Pumpimpulses (Fig. 5(d)) induzierte keinerlei zusätzlichen Chirp in dem verstärkten Signalimpuls, sondern wurde in den Leerlaufchirp übertragen (vgl. Fig. 5(c)). Es wird angemerkt, daß während dieser Pumpe-zu-Leerlauf-Übertragung das Vorzeichen der Phase umgekehrt 35 wird, welches mit dem Impulserhaltungsgesetz verträglich ist. Eine zeitliche Synchronisationsstörung von etwa 100 ps, die zwischen der Pumpe und dem Signal beobachtet wurde, beeinträchtigte die Verstärkung nicht. Rekomprimierte Signalimpulse wurden mit einem Einzelabtast-Autokorrelator 40 gemessen. Fig. 6 zeigt die Einzelabtast-Autokorrelationen der verstärkten und der nicht verstärkten Impulse. Die nicht verstärkten und die verstärkten Impulse wurden beide auf etwa 680 fs komprimiert, woraus sich identische Spuren ergaben, welches anzeigt, daß keine beobachtbaren Phasenverzerrungen aufgrund der parametrischen Verstärkung um 45 40 dB aufgetreten sind.

Obwohl der beschriebene Alexandrit-Verstärker auch zur direkten Verstärkung gestreckter ultrakurzer Impulse aus beispielsweise einem frequenzverdoppelten modenverriegelten Faser-Oszillator verwendet werden kann, besteht der grundlegende Vorteil der Verwendung des parametrischen Verstärkungsschemas in der Beseitigung der den Verstärkungsfaktor schmälernden Wirkung aufgrund der großen Bandbreite der parametrischen Verstärkung.

55 Die Verwendung von quasi-phasenangepaßten (QPM-)Werkstoffen zur parametrischen Chirimpulsverstärkung (PCPA) verringert wesentlich die erforderliche Pumpspitzenleistung und Pumpföhligkeit und erlaubt so die Auswertung von räumlich-multimodalen und langdauernden Pumpimpulsen. Sie beseitigt ferner Beschränkungen der Pumpwellenlänge und der Verstärkungsbandbreite. Dies ermöglicht eine wesentliche Vereinfachung der Pumplaseranordnung für ein Hochenergie-PCPA-System und demzufolge die Konstruktion von kompakten diodengepumpten Quellen 60 ultrakurzer optischer Impulse mit hoher Energie. Darüber hinaus erlaubt dies die Beseitigung von die Verstärkung schmälernden und phasenverzerrenden Beschränkungen der minimalen Impulsdauer, welche typisch in einem Chirimp-

pulsverstärkungssystem auftreten. Ein Beispiel für eine kompakte Quelle ultrakurzer Impulse hoher Energie ist ein Mehrfachkern-Faserbasiertes Chirimpulsverstärkungssystem. Beschränkungen der Impulsenergie aufgrund der beschränkten Kerngröße für Monomode-Fasern werden durch Verwenden eines großen Multimode-Kerns umgangen. Beschränkungen der Impulsdauer und der Strahlqualität aufgrund des Multimode-Kerns werden durch Verwenden eines Chirimpulsverstärkungssystems umgangen. Zusätzlich vereinfacht der große Kern der Multimode-Faser das Hüllpumpen durch preiswerte Multimode-Laserdioden mit hoher Leistung.

Patentansprüche

1. Optisches Impulsverstärkungssystem, gekennzeichnet durch:
eine Pumpquelle (100; 210; 710), die optische Pumpimpulse einer vorbestimmten Dauer erzeugt;
eine Signalquelle (130; 200; 440; 705; 740), die optische Signalimpulse erzeugt;
eine kombinierende Optik (106, 160; 221, 223; 460), die die optischen Pumpimpulse und die optischen Signalimpulse empfängt und kombiniert, um dadurch kombinierte optische Impulse bereitzustellen; und
einen parametrischen Verstärker (170; 220; 470), der einen quasi-phasenangepaßten Kristall umfaßt, welcher die kombinierten optischen Impulse empfängt und die optischen Signalimpulse unter Verwendung von Energie der optischen Pumpimpulse verstärkt.
2. Chirimpulsverstärkungssystem, gekennzeichnet durch das optische Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 1; und eine Kompressoreinrichtung (180), die die durch den parametrischen Verstärker verstärten optischen Signalimpulse empfängt und komprimiert.
3. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Pumpquelle zumindest eine Pumpdiode (110; 218) und zumindest eine Impulskette (120; 216, 212, 214, 300) umfaßt.
4. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Impulskette einen Faser-Verstärker (214; 212A, 212B, 214) umfaßt.
5. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 4, gekennzeichnet durch eine Kompressoreinrichtung (230), die die durch den parametrischen Verstärker verstärkten optischen Signalimpulse empfängt und komprimiert.
6. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Signalquelle umfaßt:
einen Signalimpulsgenerator (140; 202; 445); und
eine Streckeinrichtung (150; 204; 450), die durch den Signalimpulsgenerator erzeugte Signalimpulse empfängt und streckt.
7. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der parametrische Verstärker eine mehrstufige Verstärkungsanordnung (220) mit zumindest zwei quasi-phasenangepaßten nichtlinearen Kristallen (224) umfaßt.
8. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Pumpquelle ein regeneratives Alexandrit-Verstärkersystem (410) umfaßt.
9. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Signalquelle umfaßt:

eine Quelle für verstärkte optische Faser-Impulse (445); und
eine Streckeinrichtung (450), die von der Quelle für verstärkte optische Faser-Impulse bereitgestellte optische Impulse empfängt und streckt.
10. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 9, gekennzeichnet durch eine Kompressoreinrichtung (480), die die durch den parametrischen Verstärker (470) verstärkten optischen Impulse empfängt und komprimiert.
11. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Pumpquelle eine Q-geschaltete Impulskette (715; 715') umfaßt.
12. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Signalquelle eine abstimmbare Laserdiode (740) umfaßt.
13. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 12, gekennzeichnet durch eine Kompressoreinrichtung (180), die die durch den parametrischen Verstärker verstärkten optischen Impulse empfängt und komprimiert.
14. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Impulsbreite der optischen Pumpimpulse in dem Bereich zwischen 200 Pikosekunden und 5 Nanosekunden liegt.
15. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 11, gekennzeichnet durch eine Triggerelektronik (190; 240), die die Ankunft der optischen Pumpimpulse und der optischen Signalimpulse an der kombinierenden Optik (160; 221) synchronisiert.
16. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Triggerelektronik die Q-geschaltete Impulskette mittels aus der Signalquelle erhaltenen Signalen triggert.
17. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Q-geschaltete Impulskette eine aktiv Q-geschaltete Impulskette (715') ist, und daß die Signalquelle eine modenverriegelte Signalquelle ist.
18. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Triggerelektronik die Signalquelle mittels aus der Q-geschalteten Impulskette empfangener Signale triggert.
19. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Q-geschaltete Impulskette eine passiv Q-geschaltete Impulskette (715) ist, und daß die Signalquelle ein von extern synchronisierbarer Laser (740) ist.
20. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der quasi-phasenangepaßte Kristall ein periodisch gepolter nichtlinearer Kristall ist.
21. Parametrisches Chirimpulsverstärkungssystem, gekennzeichnet durch

- a. eine Pumpquelle (210), die verstärkte Pumpimpulse erzeugt, umfassend:
einen Impfimpulsgenerator (216); eine Pumpdiode (218), die Pumpenergie erzeugt;
einen Faser-Verstärker (212), der die Impfimpulse und die Pumpenergie empfängt und die verstärkten Pumpimpulse erzeugt;
- b. eine Signalquelle (200), die Signalimpulse erzeugt;
- c. eine kombinierende Optik (221, 223), die die verstärkten Pumpimpulse und die Signalimpulse empfängt und kombiniert, um dadurch kombinierte Impulse zu erzeugen; und
- d. einen parametrischen Verstärker (220), der zu-

mindest einen quasi-phasenangepaßten Kristall (224) umfaßt, welcher die kombinierten Impulse empfängt und die Signalimpulse unter Verwendung von Energie der verstärkten Pumpimpulse verstärkt.

22. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 21, gekennzeichnet durch eine Kompressoreinrichtung (230), die die durch den parametrischen Verstärker verstärkten Signalimpulse empfängt und komprimiert.

23. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß die Pumpquelle ferner umfaßt:

- zumindest eine zusätzliche Pumpdiode (218), die zumindest einen zusätzlichen Faser-Verstärker (214), der in Reihe mit dem Faser-Verstärker (212) geschaltet ist, pumpt; und
- einen akusto-optischen Modulator (300), der zwischen den in Reihe geschalteten Faser-Verstärkern angeordnet ist.

24. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, daß der Faser-Verstärker (212) ein Monomode-Faser-Verstärker ist und der zusätzliche Faser-Verstärker (214) ein Multimode-Faser-Verstärker ist.

25. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß die Pumpquelle als Mehrfachdurchlauf-Anordnung konfiguriert ist, bei der Eingänge und Ausgänge des Faser-Verstärkers (212C) durch einen akusto-optischen Modulator (301) gesteuert werden.

26. Parametrisches Chirp-Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 25, gekennzeichnet durch eine zusätzliche Pumpquelle, die als Mehrfachdurchlauf-Anordnung konfiguriert ist und einen zusätzlichen Faser-Verstärker aufweist, der durch einen zusätzlichen akusto-optischen Modulator gesteuert wird.

27. Parametrisches Chirp-Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß der Faser-Verstärker ein linearer Verstärker und mit einem Mehrfachdurchlauf-Verstärker verbunden ist, und daß der Mehrfachdurchlauf-Verstärker,

- einen Schleifen-Faser-Verstärker;
- eine Pumpe, die mit dem Schleifen-Faser-Verstärker verbunden ist; und
- einen akusto-optischen Modulator, der den Eingang und den Ausgang des Schleifen-Faser-Verstärkers steuert, umfaßt.

28. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß die Pumpquelle eine Pumpenergie erzeugt, deren Wellenlänge kürzer als die Wellenlänge der Signalimpulse ist.

29. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß die Pumpquelle ferner eine Frequenzverdopplungseinrichtung (260) umfaßt, welche die Frequenz der verstärkten Pumpimpulse empfängt und verdoppelt.

30. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß der parametrische Verstärker als zweistufiger Verstärker mit einem ersten und einem zweiten quasi-phasenangepaßten Kristall konfiguriert ist, und daß die Pumpquelle ferner einen polarisierten Strahlteiler (250) umfaßt, der das Ausgangssignal der Pumpquelle in einen ersten, den ersten quasi-phasenangepaßten Kristall versorgenden Pumpkanal und einen zweiten, den zweiten quasi-angepaßten Kristall versorgenden Pumpkanal aufteilt.

31. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß der quasi-phasenangepaßte Kristall ein periodisch gepolter, nichtlinearer Kristall ist.

32. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem, umfassend:

- eine Pumpquelle, die verstärkte Pumpimpulse erzeugt, umfassend:
 - eine Impfdiode (430);
 - einen Pumplaser (420);
 - einen regenerativen Verstärker (410), der auf die Impfdiode und den Pumplaser anspricht, um Pumpimpulse zu erzeugen;
- eine Signalquelle, die Signalimpulse erzeugt;
- eine kombinierende Optik, die die Pumpimpulse und die Signalimpulse empfängt und kombiniert, um dadurch kombinierte Impulse zu erzeugen; und
- einen parametrischen Verstärker, der zumindest einen quasi-phasenangepaßten Kristall umfaßt, welcher die kombinierten Impulse empfängt und die Signalimpulse unter Verwendung von Energie aus den Pumpimpulsen verstärkt.

33. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 32, dadurch gekennzeichnet, daß der Pumplaser einen Alexandrit-Pumplaser umfaßt, und daß der regenerative Verstärker einen regenerativen Alexandrit-Verstärker umfaßt.

34. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 32, gekennzeichnet durch eine Kompressoreinrichtung, die die durch den parametrischen Verstärker verstärkten Signalimpulse empfängt und komprimiert.

35. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 32, gekennzeichnet durch eine Trigger-elektronik, die die Impfdiode von extern triggert.

36. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 32, dadurch gekennzeichnet, daß der quasi-phasenangepaßte Kristall ein periodisch gepolter nichtlinearer Kristall ist.

37. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem, gekennzeichnet durch

- eine Pumpquelle (710), die Pumpimpulse erzeugt, wobei die Pumpquelle Pumpdioden (716) und eine Q-geschaltete Impulsquelle (715) umfaßt;
- eine Signalquelle (705), die Signalimpulse erzeugt;
- eine kombinierende Optik (160), die die Pumpimpulse und die Signalimpulse empfängt und kombiniert, um dadurch kombinierte Impulse zu erzeugen; und
- einen parametrischen Verstärker (170), der die kombinierten Impulse empfängt und die Signalimpulse unter Verwendung von Energie der Pumpimpulse verstärkt.

38. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 37, gekennzeichnet durch eine Trigger-einrichtung zum Synchronisieren der Ankunft der Pumpimpulse und der Signalimpulse an der kombinierenden Optik.

39. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 38, dadurch gekennzeichnet, daß die Triggereinrichtung die Q-geschaltete Impulsquelle mittels von der Signalquelle empfangenen Signalen triggert.

40. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 39, dadurch gekennzeichnet, daß die Q-

geschaltete Impulsquelle eine aktiv Q-geschaltete Impulsquelle ist, und daß die Signalquelle eine modenverriegelte Signalquelle ist.

41. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 38, dadurch gekennzeichnet, daß die Triggereinrichtung die Signalquelle mittels von der Q-geschalteten Impulsquelle (715) empfangenen Signale triggt. 5

42. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 41, dadurch gekennzeichnet, daß die Q-geschaltete Impulsquelle (715) eine passiv Q-geschaltete Impulsquelle ist, und daß die Signalquelle eine abstimmbare Laserdiode (740) ist. 10

43. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 42, dadurch gekennzeichnet, daß die Triggereinrichtung umfaßt: eine Photodiode (720), die die Pumpimpulse der passiv Q-geschalteten Impulsquelle erfaßt und ein Triggersignal erzeugt; und eine Steuereinrichtung (700) für abstimmbarc Dioden, die auf das Triggersignal anspricht, um die abstimmbare Laserdiode zu steuern. 15

44. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 43, gekennzeichnet durch eine Verzögerungsleitung (730), die zwischen der Pumpquelle und dem parametrischen Verstärker angeordnet ist. 20

45. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 36, dadurch gekennzeichnet, daß die Impulsbreite der optischen Pumpimpulse in dem Bereich zwischen 200 Pikosekunden und 5 Nanosekunden liegt. 30

46. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 37, gekennzeichnet durch eine Kompressoreinrichtung (180), die die durch den parametrischen Verstärker verstärkten Signalimpulse empfängt und komprimiert. 35

47. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 37, dadurch gekennzeichnet, daß der parametrische Verstärker einen nichtlinearen Kristall umfaßt. 40

48. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem, gekennzeichnet durch: eine faser-basierte Pumpquelle (210), die Pumpimpulse erzeugt; eine Signalquelle (200), die Signalimpulse erzeugt; 45 einen polarisierten Strahlteiler (250), der die Pumpimpulse in einen ersten und einen zweiten Pumpkanal aufteilt; eine erste Kombiniereneinrichtung (221), die die Signalimpulse und die Pumpimpulse aus dem ersten Pumpkanal empfängt und kombiniert, um dadurch erste kombinierte Impulse bereitzustellen; einen ersten parametrischen Verstärker (224), der einen ersten quasi-phasenangepaßten Kristall umfaßt, welcher die ersten kombinierten Impulse empfängt und die 50 Signalimpulse unter Verwendung von Energie der Pumpimpulse aus dem ersten Pumpkanal verstärkt; eine zweite Kombiniereneinrichtung, die die Pumpimpulse aus dem zweiten Pumpkanal und die Signalimpulse nach deren Verstärkung durch den ersten parametrischen Verstärker empfängt und kombiniert, um dadurch zweite kombinierte Impulse bereit zustellen; und einen zweiten parametrischen Verstärker, der einen zweiten quasi-phasenangepaßten Kristall umfaßt, welcher die zweiten kombinierten Impulse empfängt und die Signalimpulse unter Verwendung von Energie der Pumpimpulse aus dem zweiten Pumpkanal weiter verstärkt. 55

49. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 48, dadurch gekennzeichnet, daß die Pumpquelle eine Vielzahl von in Reihe verschalteten Faser-Verstärkern (212, 214) und zumindest einen akusto-optischen Modulator (300) umfaßt. 5

50. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 48, dadurch gekennzeichnet, daß die Pumpquelle zumindest einen Mehrfachdurchlauf-Faser-Verstärker (214) umfaßt, der mit einer Pumpdiode (218) verbunden ist und durch einen akusto-optischen Modulator (300) gesteuert wird. 10

51. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 48, dadurch gekennzeichnet, daß der quasi-phasenangepaßte Kristall ein periodisch gepolter nichtlinearer Kristall ist. 15

52. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die optischen Signalimpulse von einer Dauer sind, die näherungsweise gleich der vorbestimmten Dauer oder kürzer als die vorbestimmte Dauer der optischen Pumpimpulse ist. 20

53. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß die Q-geschaltete Impulsquelle eine passiv Q-geschaltete Impulsquelle (715) ist, und daß die Signalquelle eine abstimmbare Laserdiode (740) ist. 25

54. Optisches Impulsverstärkungssystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der quasi-phasenangepaßte Kristall aus periodisch gepoltem Lithium-Niobat besteht. 30

55. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 37, gekennzeichnet durch einen Festkörper-Verstärker zum Verstärken der Q-geschalteten Impulse. 35

56. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 38, dadurch gekennzeichnet, daß die Triggereinrichtung eine Photodiode (720), die entweder Signalimpulse aus der Signalquelle oder Pumpimpulse aus der Pumpquelle erfaßt und ein an den jeweils entsprechenden Gegenpart, Pumpquelle oder Signalquelle, gerichtetes Triggersignal erzeugt, umfaßt. 40

57. Parametrisches Chirpimpulsverstärkungssystem nach Anspruch 40, dadurch gekennzeichnet, daß die Triggereinrichtung eine Photodiode (720), die Signalimpulse aus der modenverriegelten Quelle erfaßt und ein an die aktiv Q-geschaltete Impulsquelle (715') gerichtetes Triggersignal erzeugt, umfaßt. 45

Hierzu 12 Seite(n) Zeichnungen

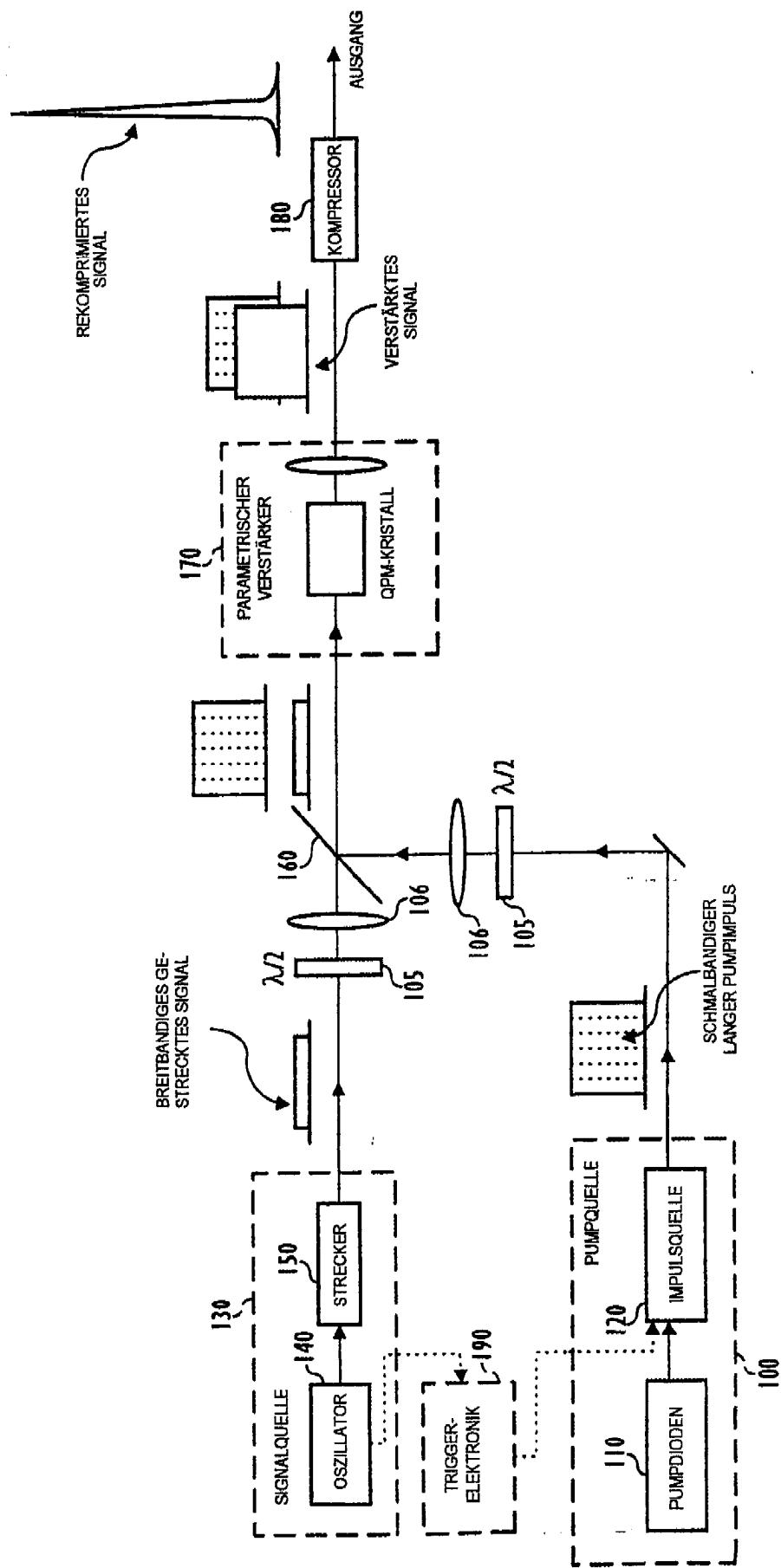


FIG. I

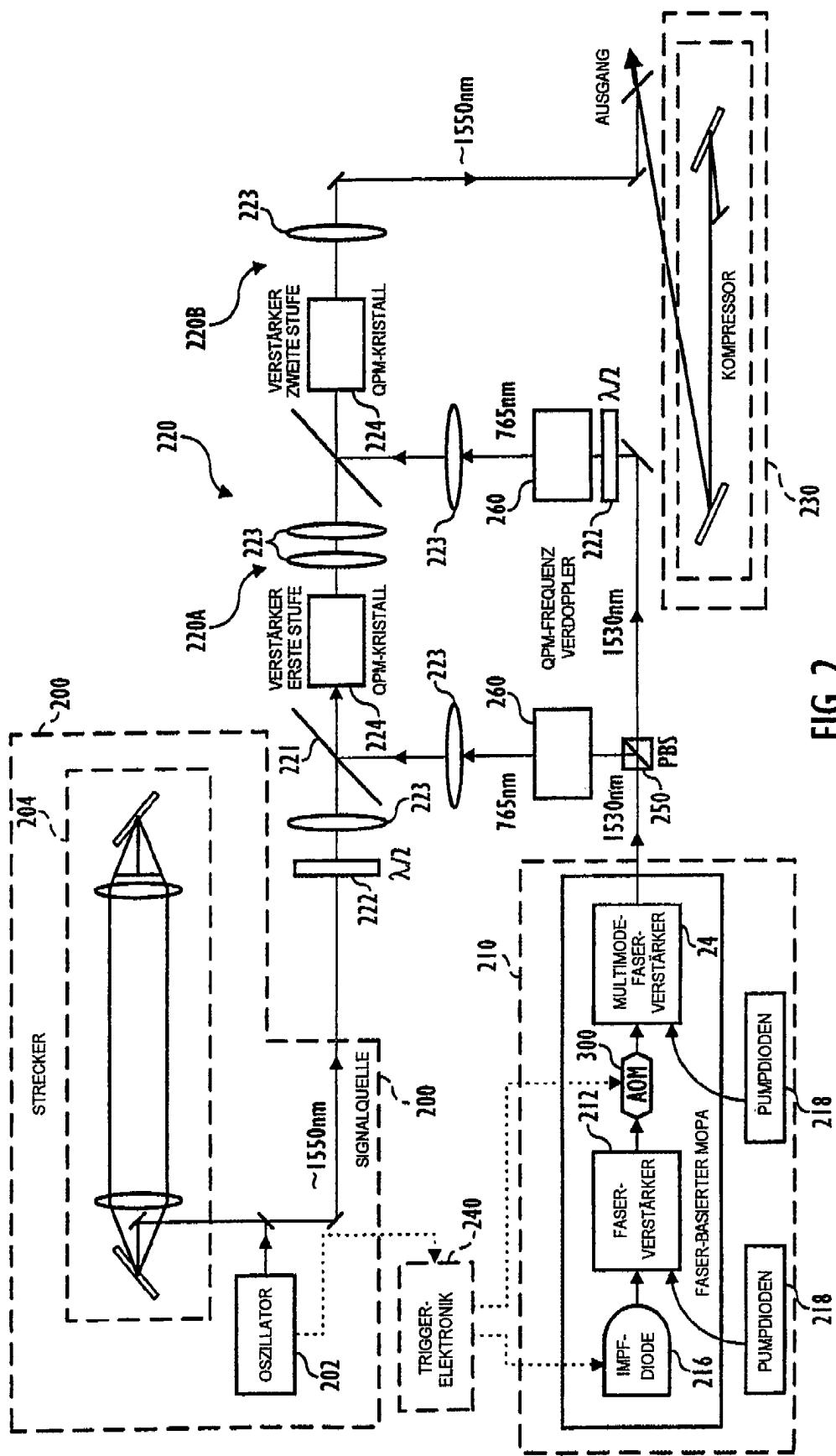


FIG. 2

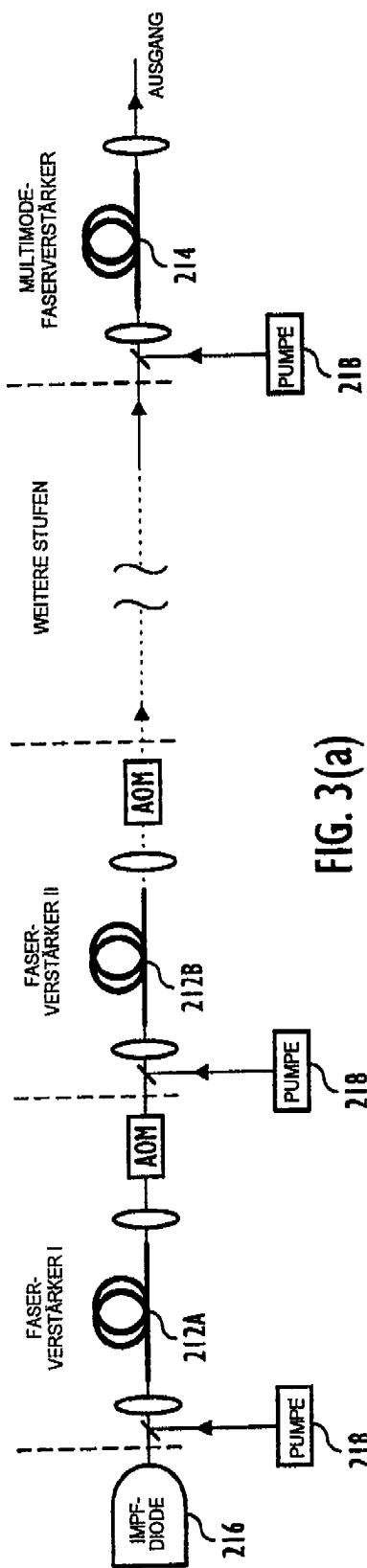


FIG. 3(a)

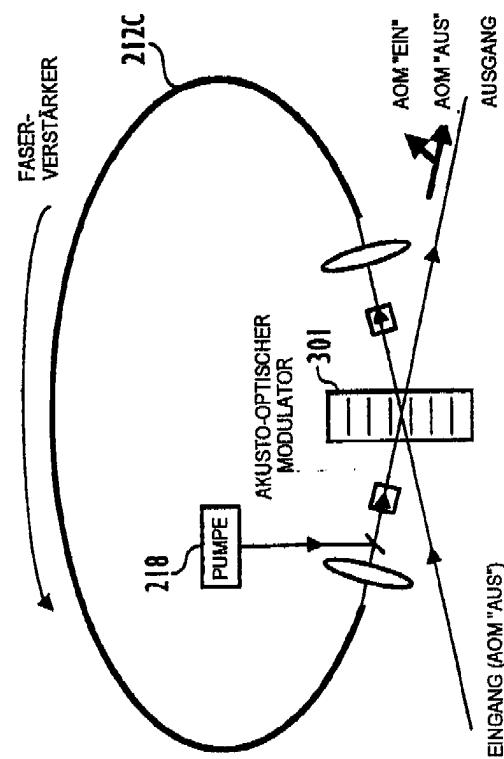


FIG. 3(b)

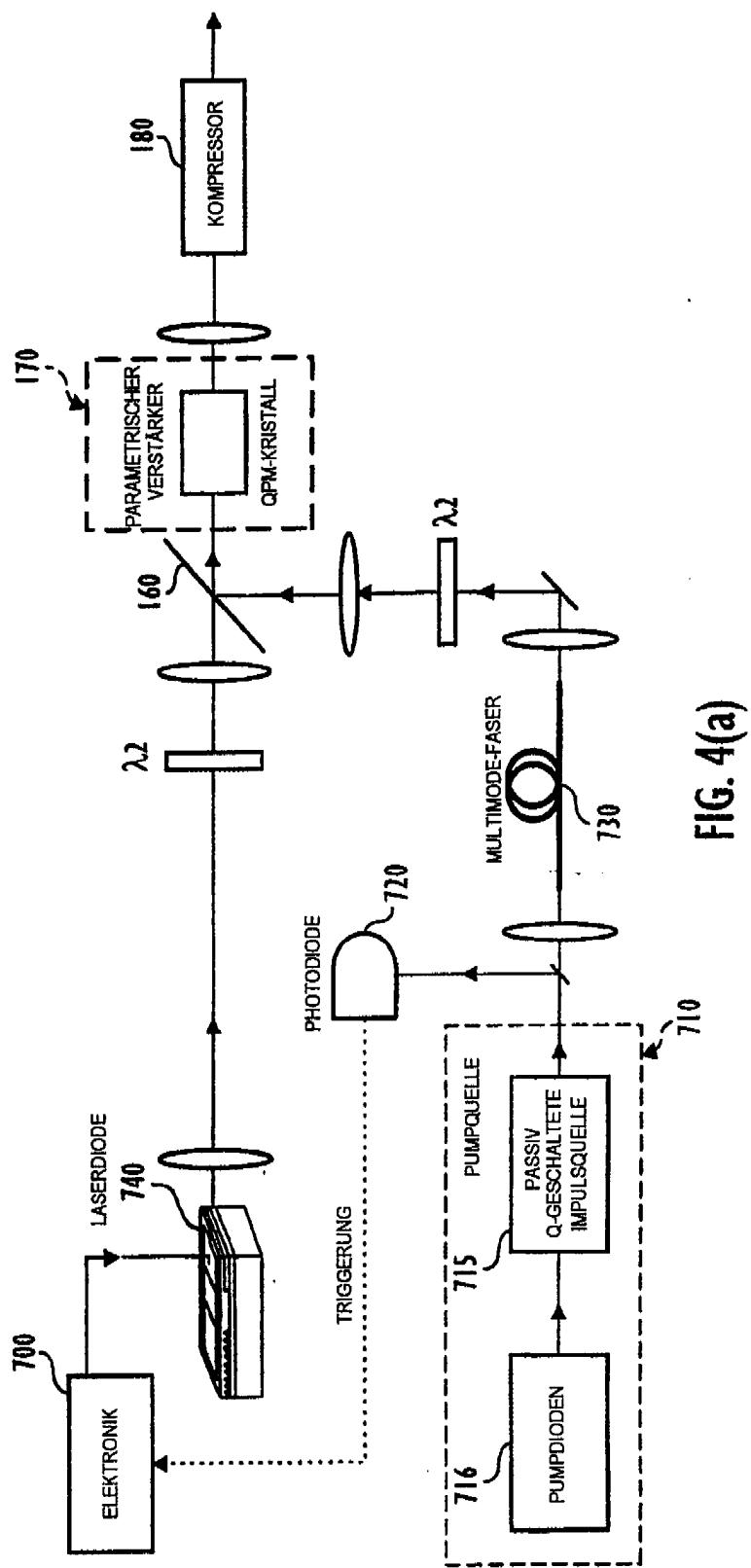


FIG. 4(a)

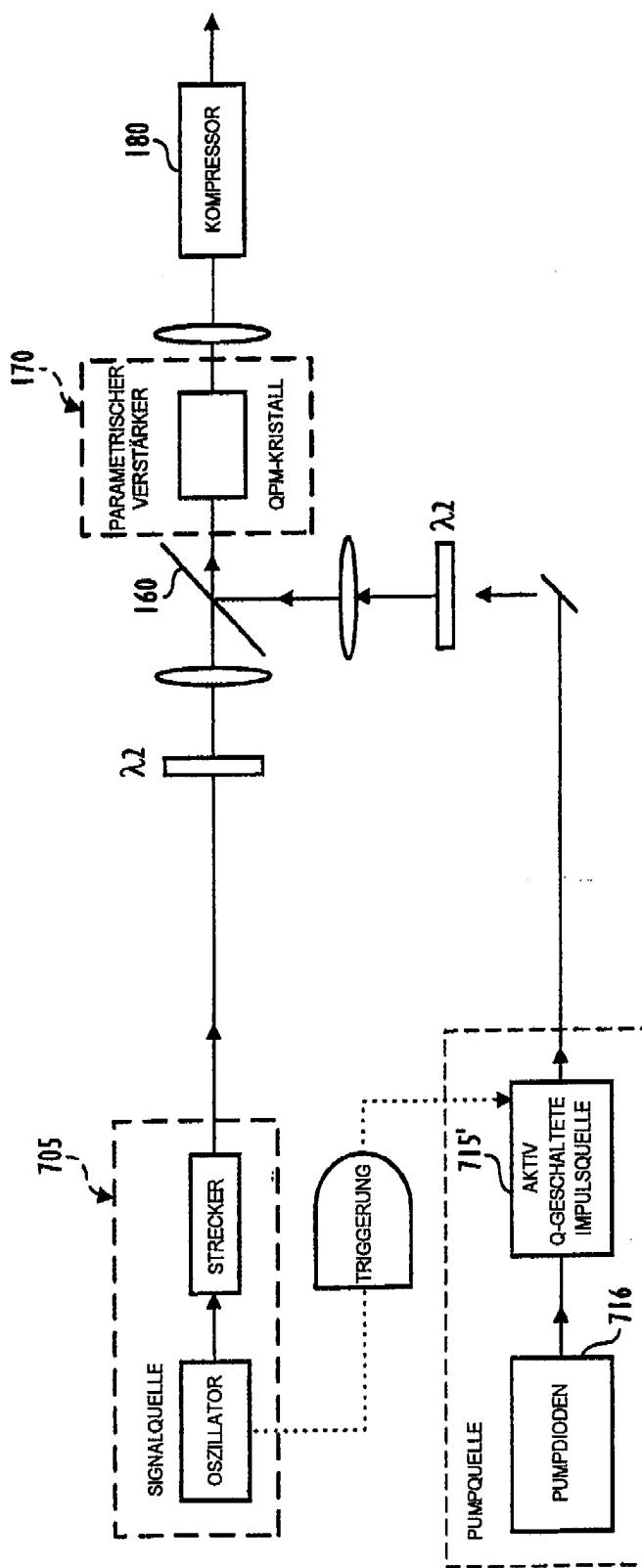


FIG. 4(b)

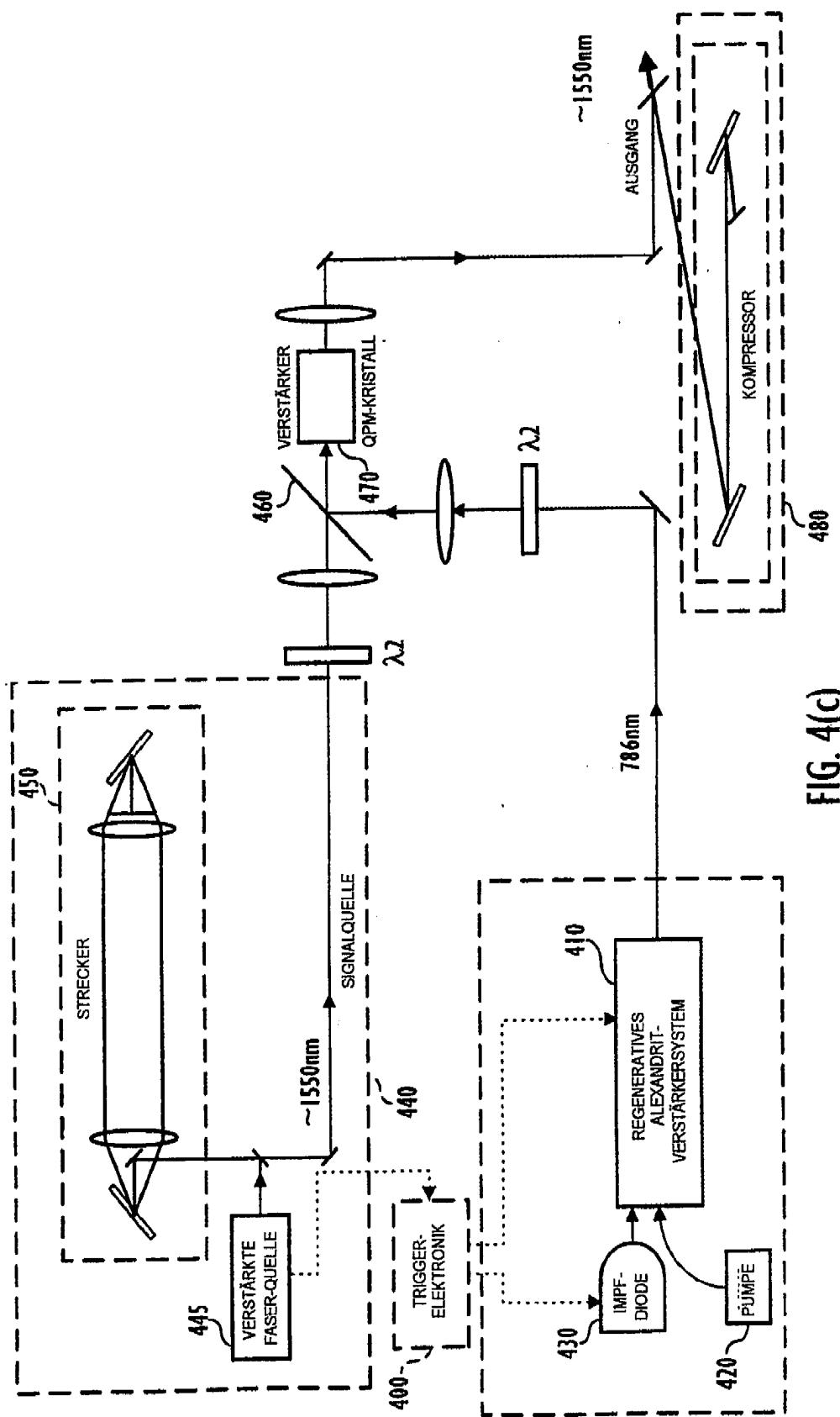


FIG. 4(c)

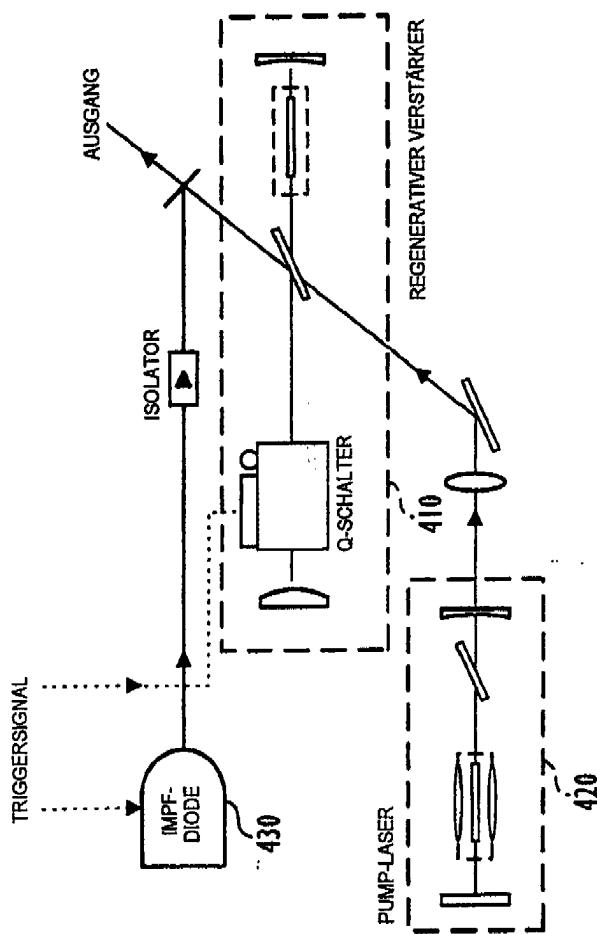


FIG. 4(d)

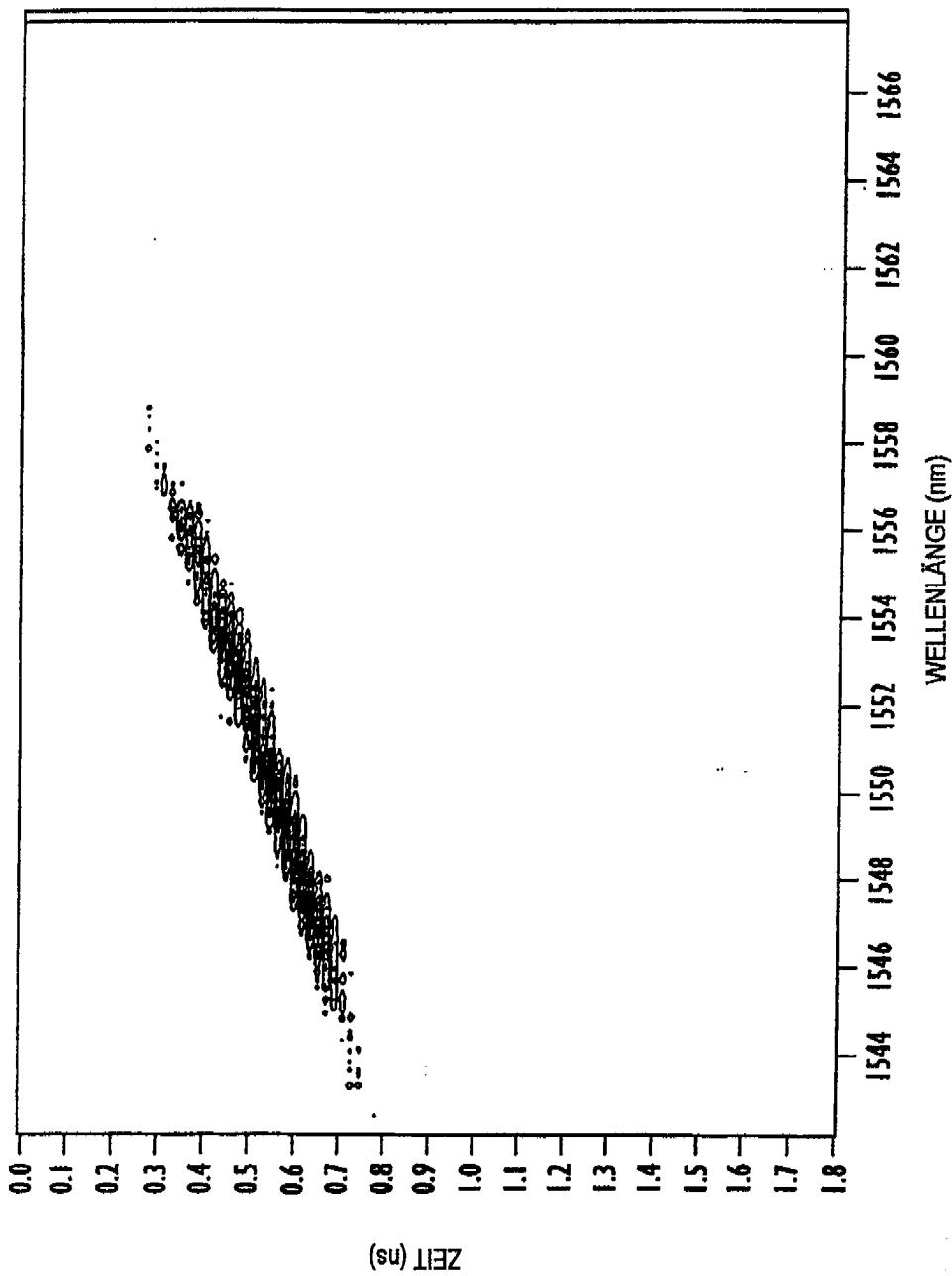


FIG. 5(a)

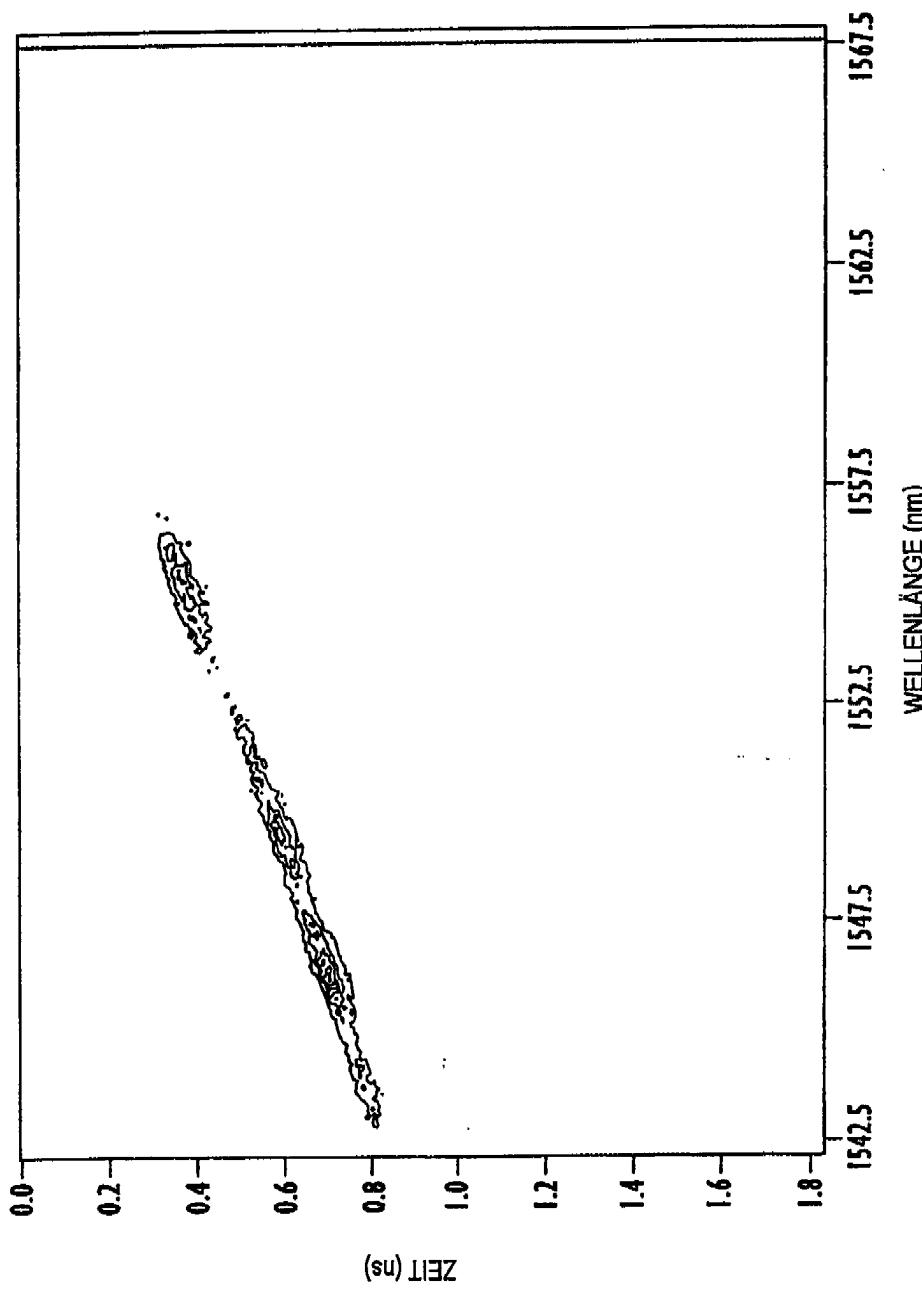


FIG. 5(b)

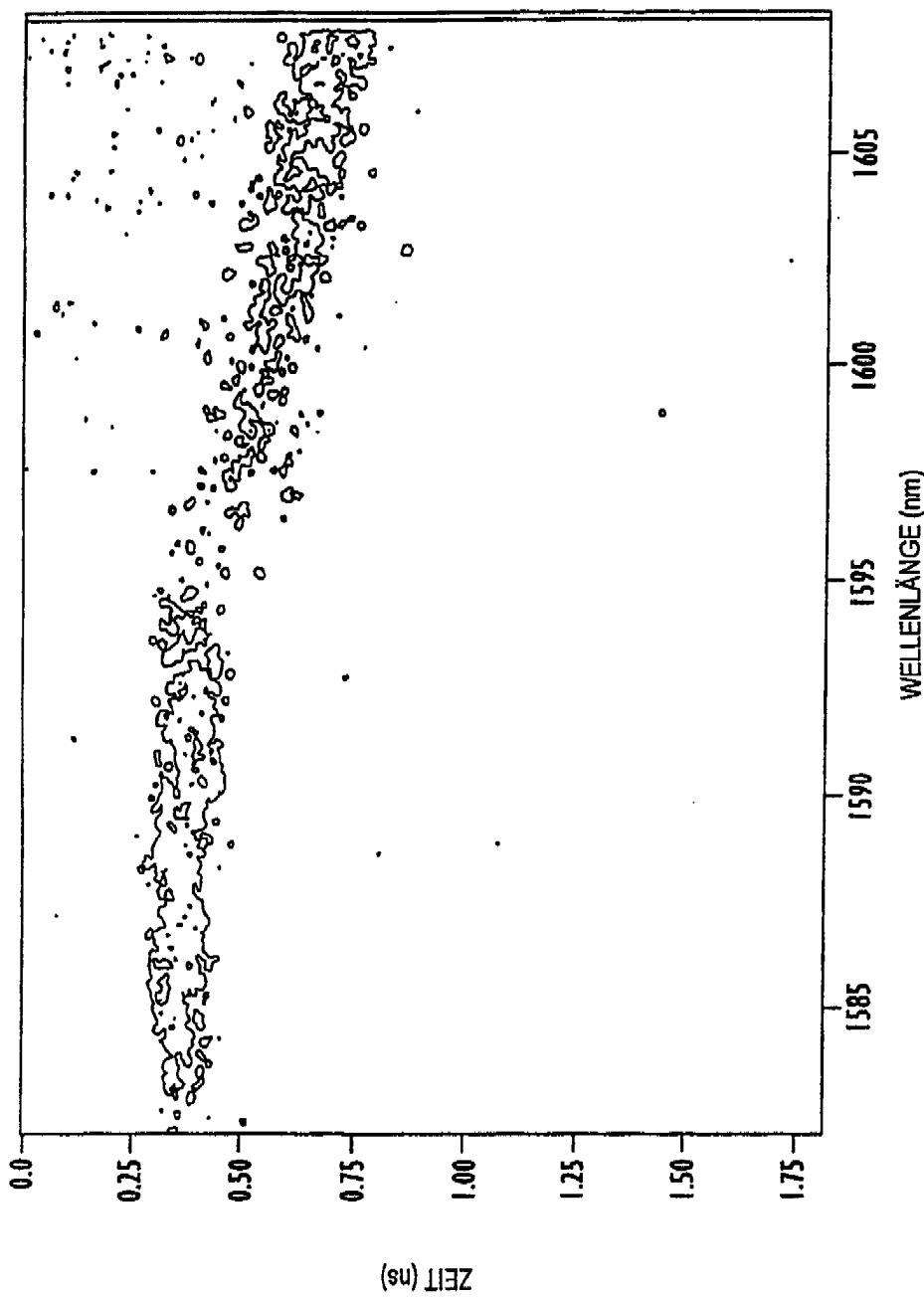


FIG. 5(c)

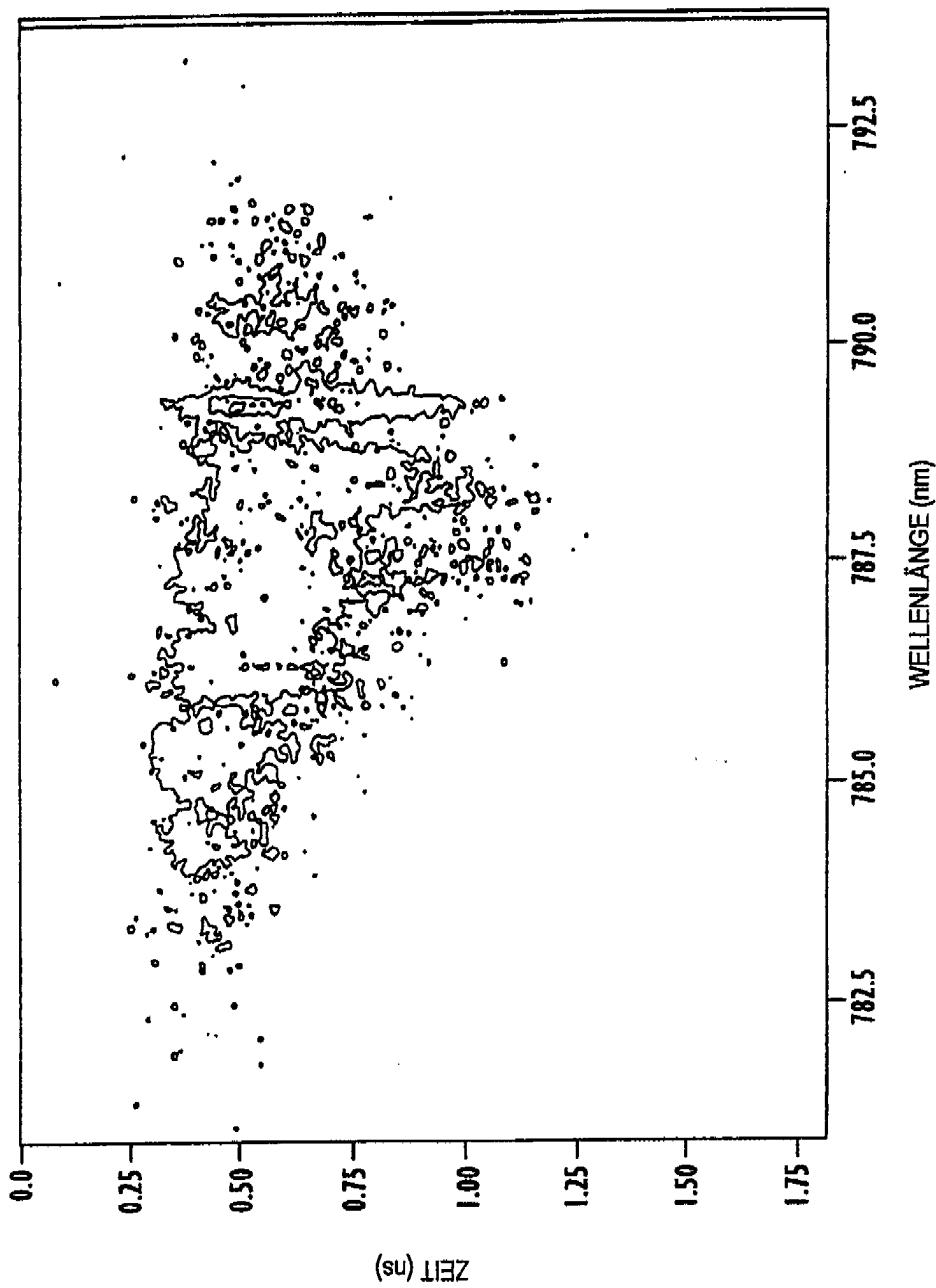


FIG. 5(d)

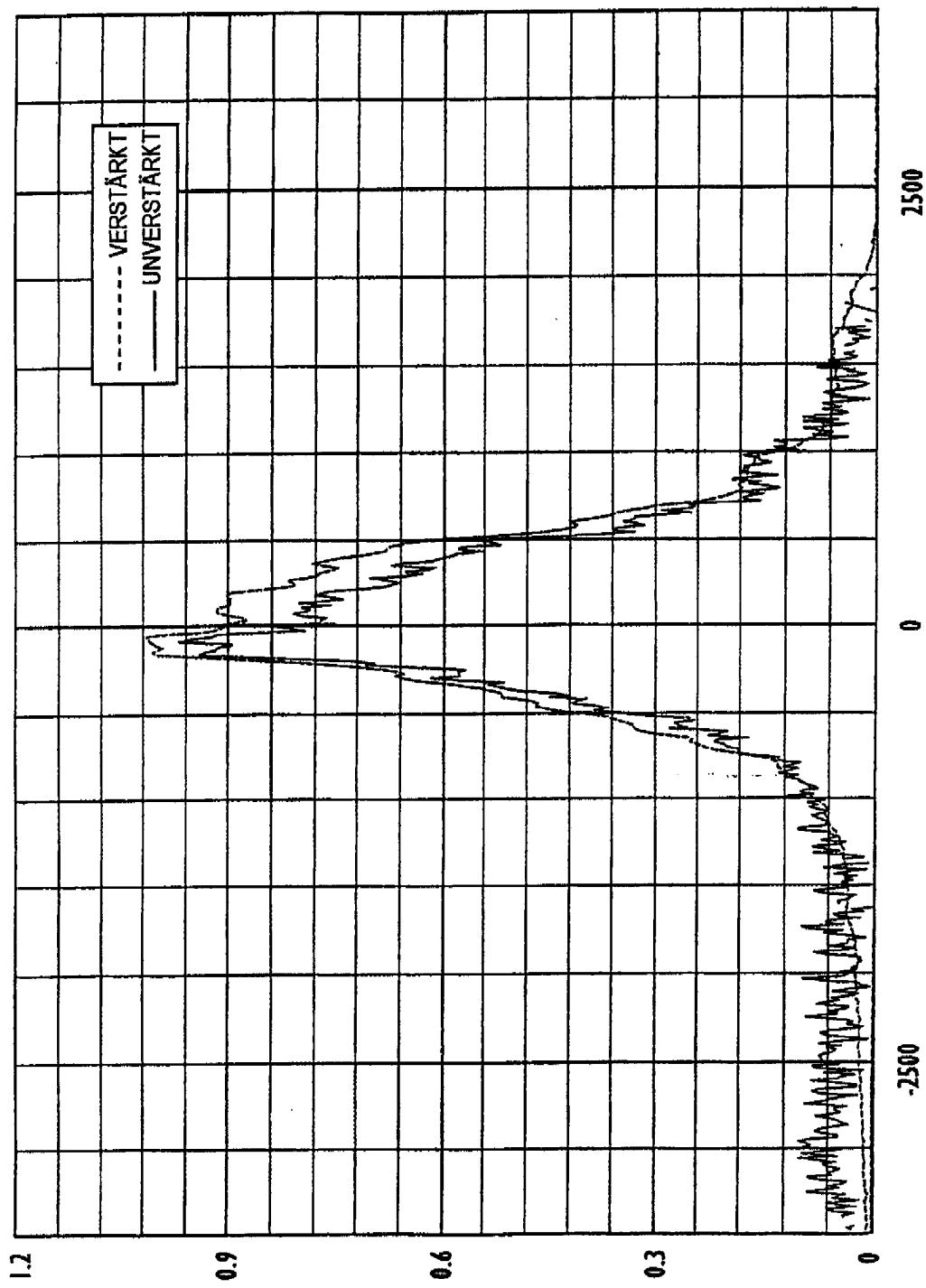


FIG. 6